



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m18/2015/02.26.17.51-TDI

**ANÁLISE E MODELAGEM DE ECOFISIOLOGIA DA  
ESPÉCIE POINCIANELLA MICROPHYLLA DA  
CAATINGA EM CAMPO E SOB CONDIÇÕES DE ALTA  
CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub>**

Luiz Felipe Campos de Rezende

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto, e Celso Von Randow, aprovada em 11 de maio de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3J3CB32>>

INPE

São José dos Campos

2015

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):**

### **Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **Membros:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m18/2015/02.26.17.51-TDI

**ANÁLISE E MODELAGEM DE ECOFISIOLOGIA DA  
ESPÉCIE POINCIANELLA MICROPHYLLA DA  
CAATINGA EM CAMPO E SOB CONDIÇÕES DE ALTA  
CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub>**

Luiz Felipe Campos de Rezende

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto, e Celso Von Randow, aprovada em 11 de maio de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3J3CB32>>

INPE

São José dos Campos

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Rezende, Luiz Felipe Campos de.

R339a Análise e modelagem de ecofisiologia da espécie *Poincianella microphylla* da Caatinga em campo e sob condições de alta concentração de CO<sub>2</sub> / Luiz Felipe Campos de Rezende. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxxii + 147 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m18/2015/02.26.17.51-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto, e Celso Von Randow.

1. Modelos de vegetação global dinâmica. 2. Velocidade máxima de carboxilação (V<sub>cmax</sub>). 3. Mineração de dados. 4. Produtividade primária bruta (PPB). 5. Eficiência do uso da água (EUA). I.Título.

CDU 581.5:502.3(81)

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

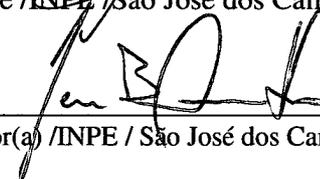
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de **Doutor(a)** em  
**Ciência do Sistema Terrestre.**

Dr. Plínio Carlos Alvalá

  
\_\_\_\_\_  
Presidente /INPE/ São José dos Campos - SP

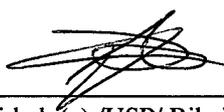
Dr. Jean Pierre Henry Balbaud  
Ometto

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) /INPE / São José dos Campos- SP

Dr. Celso Von Randow

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) /INPE/ São José dos Campos- SP

Dr. Tomas Ferreira Domingues

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) /USP/ Ribeirão Preto- SP

Dr. Rômulo Simões Cezar  
Menezes

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) /UFPE/Recife- PE

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples.

() unanimidade.

Título: "ANÁLISE E MODELAGEM DE ECOFISIOLOGIA DA ESPÉCIE  
POINCIANELLA MICROPHYLLA DA CAATINGA EM CAMPO E SOB  
CONDIÇÕES DE ALTA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub>."

Aluno (a): Luiz Felipe Campos de Rezende

São José dos Campos, 11 de Maio de 2015.



O que hoje é evidência foi outrora imaginação.

(William Blake)

No meu prato que mistura de Natureza!

As minhas irmãs as plantas,

As companheiras das fontes, as santas

A quem ninguém reza...

(Fernando Pessoa)



À Vivéca e ao Tariq Lemos de Rezende, preciosidades em minha vida,  
fundamentais pelo apoio na realização deste trabalho, dedico.



## AGRADECIMENTOS

É uma lista grande de agradecimentos que devo fazer (me desculpem quem por ventura, deixei de fora). Porque sem a participação e ajuda dessas pessoas não conseguiria realizar este trabalho que envolveu trabalhos de campo em Petrolina-PE e em laboratório, em São Paulo, na USP.

Agradeço a Deus por tudo; e pelas pessoas e pelas oportunidades nos lugares e nos momentos certos.

Quero agradecer ao orientador Dr. Jean Ometto (CCST-INPE) por me acolher, por acreditar, por sua amizade, apoio e entusiasmo no percurso do doutorado, sua visão e experiência foram muito importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Celso von Randow (CCST-INPE) pela amizade e pela eficiência, que pude desfrutar de seu conhecimento sobre modelos de vegetação e sobre a interação biosfera-atmosfera e pela oportunidade de trabalharmos juntos.

À Dra. Magna Soelma (Embrapa Semiárido) a quem sou profundamente grato, pois sem o seu apoio, os trabalhos não teriam sido realizados. As empreitadas (4 horas da manhã no campo) foram realizadas sempre com muito profissionalismo e bom humor para enfrentar as condições adversas da Caatinga: calor e a dificuldade de se locomover com os equipamentos naquele ambiente. Por sua amizade e pela excelente acolhida em Petrolina, meu muitíssimo obrigado.

Ao Dr. Marcos Silveira Buckeridge (USP-LAFIECO) que nos recebeu de forma atenciosa e se entusiasmou e possibilitou que o experimento com alto CO<sub>2</sub> com uma espécie nativa da Caatinga fosse realizado no LAFIECO.

À Dra. Bruna Arenque-Musa (USP-LAFIECO) que abraçou a ideia desta pesquisa, mais do que parceira nessa empreitada, foi uma orientadora para questões de fisiologia de plantas, além de coordenar o experimento no LAFIECO, participou de forma entusiástica e imprescindível nas campanhas na

Caatinga. Teve inestimável contribuição neste trabalho. Minha enorme gratidão a essa amiga.

Ao Dr. Saulo de Tarso Aidar (Embrapa Semiárido), pela amizade e a maneira receptiva que nos acolheu, seu inestimável trabalho de realizar as medidas no meio da mata, pelas discussões e aulas de ecofisiologia da Caatinga. Sou profundamente grato.

Ao Dr. Rômulo Simões do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco UFPE, pelo apoio logístico, pelas sementes de *pyramidalis* pelos testes de catingueira e pela boa vontade e entusiasmo sempre.

À Ana Maria Inácio (USP-LAFIECO) que desempenhou a importante função de cuidar, regar as plantas cultivadas nas câmaras de topo aberto na USP, além de participar nas campanhas realizadas no LAFIECO.

Ao Dr. Eurico Rodrigues de Paula, da Geofísica Espacial do INPE com quem muito aprendi em Ciência durante 9 anos em que foi meu chefe e orientador do mestrado e ao Dr. Stephan Stephany, da Computação Aplicada do INPE, orientador empenhado, amigo e participante no meu mestrado, e que fez sugestões na parte computacional desse texto.

À Dra. Luciana Sanddra (da Universidade Rural de Pernambuco – Unidade de Serra Talhada), Seu Pedro (mateiro da Embrapa Semiárido) que nos ajudaram a coletar sementes, Gilson Denys (Embrapa Semiárido) e Joemerson Ferreira Damaceno (Embrapa Semiárido) pelo auxílio nas campanhas na Caatinga.

Agradeço à Adriana Grandis, Dra. Amanda Pereira de Souza, Dra. Viviane Lopes da Costa e Eglee Silvia Gonçalves Igarashi que nos ajudaram nas campanhas na USP-LAFIECO.

Ao Dr. Ivan Kantor (INPE), Dr. Márcio Muella (UNIVAP) e Dra. Patrícia Mara de Siqueira Negreti (INPE), colegas e coautores em diversos artigos. E ao Paulo Pernomian, da Geofísica Espacial, pelo suporte inicial em Linux.

Agradeço à Dra. Ana Paula Cunha (CEMADEN) que me deu as primeiras informações sobre o IBIS – modelo que originou o INLAND.

Agradeço ao Dr. Everardo Sampaio (UFPE) que sempre me atendeu de forma bastante atenciosa, seja nas reuniões de projeto ou pelas consultas por *e-mail*.

Ao Dr. José Alves Siqueira Filho e ao Dr. Marcos Vinícius Meiado da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) e ao pesquisador Frans Pareyn do Programa Plantas do Nordeste (PNE), pela ajuda na obtenção de sementes de catingueira.

Ao Dr. Alistair Rogers (Environmental Sciences Department Brookhaven National Laboratory Upton, NY-USA) e Dra. Lisa Ainsworth (Department of Plant Biology – University of Illinois-USA) pelas informações sobre dados de  $V_{c_{max}}$  para arbustos de semiárido nos Estados Unidos.

Ao Dr. Mauro Guida (UFPE) pelas discussões de medidas de  $V_{c_{max}}$  na Caatinga. Ao Dr. Marcelo Pompelli (UFPE) e ao Júlio César Rodrigues Martins (UFPE), os meus agradecimentos pelo apoio em Recife e Garanhuns.

Ao Dr. Tomas Domingues (USP) pelo fornecimento de seu modelo de fotossíntese para fins de comparação de valores de  $V_{c_{max}}$  obtidos nas campanhas em Petrolina-PE.

Ao Eduardo Barbosa (CPTEC-INPE) pelos dados de climatologia de Petrolina-PE.

À Angela Harada (CCST) e Mariana Caroline (CCST) pelo eficiente apoio burocrático e logístico.

Aos colegas do CCST-INPE, meu muito obrigado por esses anos de convivência, amizade e cooperação.

Aos bravos e destemidos motoristas do INPE, pelas viagens a São Paulo: USP e aeroporto, em horários de “rush”.

À Simone Angelica Del Ducca e Marilucia Santos Melo Cid, da Biblioteca do INPE pelo pronto atendimento na providência de artigos e livros que eu solicitei.

À Yolanda Ribeiro da Silva Souza e André Luis Dias Fernandes, do SID, do INPE pelo atendimento e dúvidas quanto à submissão e formatação da tese.

À família pelo apoio sempre. Meus pais (Antônio Rezende, em memória e Eunice E. C. de Rezende) pelos sacrifícios da educação e da criação. Ao apoio de seu Luiz Weber e dona Lina, sempre.

Lembro-me de minha avó (Carmelita Campos) que me incentivou o gosto pelas plantas e que na sua simplicidade tinha a intuição da teoria Gaia que atualmente é aceita pela comunidade científica como uma teoria de ecologia avançada.

Agradecimentos à CAPES e ao CNPq (Processo 142038/2011-3) pelo apoio na realização deste trabalho.

E por fim, agradecimento aos projetos: IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A COBERTURA E USO DA TERRA EM PERNAMBUCO: GERAÇÃO E DISPONIBILIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES PARA O SUBSÍDIO A POLÍTICAS PÚBLICAS - Processo num. 2009/52468-0 e ao projeto CAATINGA-FLUX: MONITORAMENTO DOS FLUXOS DE ENERGIA, CO<sub>2</sub> E VAPOR D'ÁGUA E DA FENOLOGIA EM ÁREA DE CAATINGA- Processo num. 483223/2011 pelo suporte aos trabalhos de campo.

## RESUMO

O bioma Caatinga é extremamente importante devido à sua biodiversidade, seu endemismo e suas dimensões (844.453 km<sup>2</sup>). Apesar de sua importância, ainda são escassas as informações sobre a fisiologia das espécies da Caatinga. Medidas de fisiologia vegetal são cruciais para a calibração de Modelos de Vegetação Global Dinâmica (DGVMs) que são utilizados para simular as respostas da vegetação diante das mudanças globais. Um dos objetivos deste trabalho foi calibrar a velocidade máxima de carboxilação ( $V_{c_{max}}$ ) de um DGVM (neste caso, do modelo INLAND) e desta forma melhorar a representação de produtividade e da Eficiência do Uso da Água (EUA) no modelo. Num trabalho de campo realizado numa área de floresta preservada na Caatinga, localizada em Petrolina-PE, medidas de assimilação de carbono em resposta à luz e à concentração de CO<sub>2</sub> foram realizadas sobre 11 indivíduos de *Poincianella microphylla* (Mart. ex G. Don) L.P. Queiroz, uma espécie nativa que é abundante nesta região. Estes dados foram utilizados em Regressão Linear Múltipla (MLR) e técnicas de mineração de dados como *Classification And Regression Tree* (CART) e *K-MEANS* para se obter uma equação de ajuste e valores de médios de  $V_{c_{max}}$ . Na sequência, foi realizada a simulação de Produtividade Primária Bruta (PPB) no INLAND utilizando a equação obtida na regressão para estimar a  $V_{c_{max}}$  e os valores médios de  $V_{c_{max}}$  obtidos pelos métodos CART, K-MEANS. Os resultados foram comparados com dados observados de PPB obtidos com sensores meteorológicos e ambientais instalados numa torre na mesma área experimental. Verificou-se que a PPB simulada atingiu 72% da PPB observada ao se utilizar os valores de  $V_{c_{max}}$  calibrada, enquanto que o modelo não calibrado obteve 42% da PPB observada. Observou-se também que a simulação da EUA atingiu 92% da EUA observada. Desta forma, este trabalho comprova e reforça a importância de utilizar medidas ecofisiológicas obtidas em campo com a finalidade de calibrar de DGVMs. Diante do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera num cenário de mudanças globais tem se

observado e relatado algumas respostas da vegetação como o ganho de biomassa e o aumento da EUA. Com o objetivo de estudar quais seriam as respostas da vegetação da Caatinga ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera foi realizado um experimento em laboratório cultivando plântulas da espécie: *P. microphylla* em câmaras de topo aberto (OTCs) em quatro condições diferentes: 1. concentração de CO<sub>2</sub> numa atmosfera ambiente (400 ppm) e sob estresse hídrico; 2. concentração de CO<sub>2</sub> numa atmosfera enriquecida (800 ppm) e sob estresse hídrico; 3. concentração de CO<sub>2</sub> numa atmosfera ambiente (400 ppm) e as plântulas submetidas a regas a cada dois dias; 4. concentração de CO<sub>2</sub> numa atmosfera enriquecida (800 ppm) e as plântulas submetidas a regas a cada dois dias. Os resultados corroboram diversos relatos registrados na literatura como o ganho de biomassa e o aumento da EUA para plantas cultivadas numa elevada concentração de CO<sub>2</sub>. São respostas conhecidas para a vegetação de outros biomas, no entanto ainda eram desconhecidas para espécies da Caatinga.

# **ANALYSIS AND MODELING OF ECOPHYSIOLOGY OF SPECIE *Poincianella Microphylla* FROM CAATINGA REALIZED IN FIELD AND UNDER CONDITIONS OF HIGH CO<sub>2</sub> CONCENTRATION**

## **ABSTRACT**

The Caatinga biome is extremely important because of its biodiversity, its endemism and its dimensions (844,453 km<sup>2</sup>). Despite its importance, there is little information about the physiology of the species of the Caatinga. Plant physiology measurements are crucial to the calibration of Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs) that are used to simulate the responses of vegetation in face of global changes. One goal of this study was to calibrate the maximum velocity of carboxylation ( $V_{C_{max}}$ ) of a DGVM (in this case, the INLAND model) and thus improve the representation of productivity in the model. In a fieldwork carried out in a preserved forest area of Caatinga located in Petrolina, Pernambuco, measurements of carbon assimilation in response to light and CO<sub>2</sub> concentration were performed on 11 individuals of *Poincianella microphylla* (Mart. Ex G. Don) LP Queiroz, one native species that is abundant in this region. These data were used in Multiple Linear Regression (MLR) and data mining techniques Classification and Regression Tree (CART) and K-means to obtain a fit equation and  $V_{C_{max}}$  average values. Then, Gross Primary Productivity (GPP) was simulated in INLAND using the average values of  $V_{C_{max}}$  obtained by CART, K-MEANS methods, or calculated by the regression equation. The results were compared with observed data of GPP obtained with meteorological and environmental sensors installed in a tower in Petrolina. It was found that the simulated GPP reached 72% of the observed GPP when using the calibrated values of  $V_{C_{max}}$ , while the uncalibrated model obtained 42% of the observed GPP. Thus, this work reinforces the importance of using ecophysiological measurements for calibration of the DGVMs.

In face of increased CO<sub>2</sub> concentrations in the atmosphere in a scenario of global change some responses of vegetation as biomass gain and the increase in Water Use Efficiency (WUE) have been observed and reported. In order to

study what is the response of the vegetation of the Caatinga to increased CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere a laboratory experiment was conducted cultivating seedlings of the species *P. microphylla* in open-top chambers (OTCs) in four different conditions: 1. CO<sub>2</sub> concentration in ambient atmosphere (400 ppm) and under water stress; 2. CO<sub>2</sub> concentration in enriched atmosphere (800 ppm) and under water stress; 3. CO<sub>2</sub> concentration in ambient atmosphere (400 ppm) and with the seedlings subjected to irrigation every two days; 4. CO<sub>2</sub> concentration in enriched atmosphere (800 ppm) and with the seedlings subjected to irrigation every two days. The results corroborate many reports presented in the literature as the gain of biomass and increasing of WUE to plants grown in a high concentration of CO<sub>2</sub>. These are known responses for vegetation from other biomes, however were still unknown to species of Caatinga.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Registros da concentração de CO <sub>2</sub> atmosférico realizados em Mauna Loa, no Havai – médias mensais desde 1958. A linha vermelha representa dados de dióxido de carbono medidos como a fração molar de ar seco e a curva preta representa esses dados corrigidos através da sazonalidade. Fonte: NOAA (2014).....	1
Figura 1.2 – Principais respostas das plantas a uma elevada concentração de CO <sub>2</sub> , o sinal (+) indica efeitos positivos e (-) indica efeitos negativos. Fonte: Adaptada de Buckeridge (2008) e Sage (2002). ....	4
Figura 1.3 – O Semiárido brasileiro com o mapa da Caatinga. (Fonte: ARAUJO FILHO, 2011).....	7
Figura 3.1 – Processos fotoquímico e bioquímico da fotossíntese no cloroplasto. 19 Fonte: Adaptada de Buckeridge et al. (2008) e Taiz; Zeiger (2009) .....	19
Figura 3.2 Diferença morfológica das plantas C <sub>3</sub> e C <sub>4</sub> (mesófilo e bainha) .....	20
Figura 3.3 Hierarquia de complexidades como critério de definição de tipos funcionais Fonte: adaptada de Körner, C. (1993).....	24
Figura 3.4 Classificação dos DGVMs em relação ao modelo de FvCB e conteúdo de nitrogênio nas folhas .....	27
Figura 3.5 (a) Gráfico conceitual das respostas das plantas (em diversos níveis: célula, órgão, planta e população) ao alto CO <sub>2</sub> atmosférico e escala temporal em que ocorre o processo (b) gráfico conceitual mostra a resposta de fotossíntese das plantas em relação ao aumento de CO <sub>2</sub> na atmosfera, mostrando as respostas como: A – aumento de taxas de fotossíntese; B – redução estomática; e C – limitação de nutrientes (N, P) para a fotossíntese diante da alta demanda de CO <sub>2</sub> – numa escala temporal. Fonte: Adaptada de Smith; Dukes (2012) .....	29
Figura 3.6 Evolução dos DGVMs em relação à fisiologia de plantas .....	30
Figura 3.7 – Esquema do Modelo INLAND (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2012) .....	35
Figura 3.8 Esquema do modelo INLAND e seus componentes (componentes novos/previstos em cinza) Fonte: Tourigny (2014) .....	36

Figura 4.1 Esquema de uma câmara de topo aberto - Fonte: adaptado de Arenque (2010) .....	44
Figura 4.2 Câmaras de topo aberto e experimento LAFIECO (a) 4 câmaras de topo aberto (OTC) em experimento com a catingueira falsa; b) Esquema do experimento descrevendo as condições de concentração de CO <sub>2</sub> e estresse hídrico para cada uma das câmaras em que as plantas foram cultivadas .....	45
Figura 4.3 Localização geográfica do experimento de campo e torre micrometeorológica instalada na CPATSA em Petrolina, PE.Fonte: adaptado de Cunha et al. (2013) .....	49
Figura 4.4 - Climatologia de PETROLINA( Lat: -9,38 S Long: -40,49 S ) (1997-2011). Fonte: CPTEC-INPE (2011) .....	50
Figura 4.5 a. Alcance dos sensores instalados na torre (footprint): em condições estáveis (~150 m) e em condições instáveis (~50m); b.Direção predominante dos ventos (125 <sup>o</sup> ) .....	51
Figura 4.6 a Indivíduos de <i>P. microphylla</i> distribuídos a partir da torre com equipamentos meteorológicos – imagem realizada com o auxílio do aplicativo Google Earth; b um indivíduo de <i>P. microphylla</i> demarcado .....	57
Figura 4.7 Definição das variáveis independentes e dependente. ....	61
Figura 4.8 Esquema da modelagem para a calibração do Vcmax: aquisição de dados, implementação de banco de dados, a calibração (CART, K-MEANS, MLR), implementação das regras geradas e equações no código do modelo INLAND .....	62
Figura 4.9 Cenários (RCPs) de emissões para CO <sub>2</sub> .....	69
Figura 5.1 – Registro das médias das temperaturas do ar e umidade relativa do ar dentro das câmaras (OTCs) para o período do experimento de cultivo com elevada concentração de CO <sub>2</sub> (30 de janeiro a 18 de abril de 2013) constando os tempos das coletas e medidas de trocas gasosas: T1 (38 dias) e T2 (79 dias) no LAFIECO-USP .....	71
Figura 5.2 Umidade do solo para os quatro tratamentos durante o período do experimento de cultivo com elevada concentração de CO <sub>2</sub> (30 de janeiro a 18 de abril de 2013) – no LAFIECO-USP – com os valores médios dos sensores de umidade de solo de cada câmara (OTC). Topo (os sensores estavam na	

parte superior do vaso) –a partir do vigésimo nono dia do experimento (linha vertical): os sensores foram deslocados para a parte inferior do vaso (Base)	72
Figura 5.3 Assimilação e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a.T1; b. T2	74
Figura 5.4 Relação Ci/Ca e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a.T1; b.T2	74
Figura 5.5 $V_{C_{max}}$ e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a. T1; b. T2	75
Figura 5.6 Condutância estomática e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a. T1; b. T2	76
Figura 5.7 EUA para os 4 tratamentos (n=5): em T1 e T2	77
Figura 5.8 Área foliar e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a. T1; b. T2	78
Figura 5.9 Número de folhas e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a. T1; b. T2	78
Figura 5.10 Altura e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a. T1; b. T2	79
Figura 5.11 Biomassa seca das folhas e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a. T1; b. T2	79
Figura 5.12 Biomassa seca do caule e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a. T1; b. T2	80
Figura 5.13 Biomassa seca da raiz e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a. T1; b. T2	81
Figura 5.14 Biomassa seca total e SE (n=5) para os 4 tratamentos: a. T1; b. T2	81
Figura 5.15 Taxa de Assimilação Líquida (TAL) e Taxa de Crescimento Relativo (TCR) para quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado, (n=5); a. Taxa de Assimilação Líquida (TAL); b. Taxa de Crescimento Relativo (TCR)	82
Figura 6.1 Dispersão do Déficit de Pressão de Vapor ao nível da Folha (DPVF) e assimilação de carbono (A) para as campanhas de 2013 e 2014 em Petrolina-PE, para a espécie <i>P. microphylla</i>	91
Figura 6.2 Dados de $V_{C_{max}}$ , temperatura do ar e $DPV_F$ obtidos nas campanhas...	92
Figura 7.1 - Dispersão da $V_{C_{max}}$ para <i>P. microphylla</i> obtida nas campanhas de 2013 e 2014 em Petrolina-PE e ajuste de $V_{C_{max}}$ através Regressão Linear Múltipla (MLR)	95
Figura 7.2 Árvore de classificação do $V_{C_{max}}$ pelo algoritmo CART	96

Figura 7.3 Histograma que mostra o número de vezes em que o modelo assumiu assimilação por limitação da carboxilação (Ac), assimilação por limitação no transporte de elétrons (Aj) ou assimilação por limitação de triose fosfato (At) 98

Figura 7.4 Totais de Produtividade Primária Bruta (PPB) e Troca Líquida do Ecossistema (TLE) para o ano de 2011 em Petrolina-PE – comparações dos resultados dos quatro métodos (algoritmo CART, NÃO CALIBRADO no INLAND, algoritmo K-MEANS e regressão (MLR)) e dados observados. a. PPB; b. TLE; c. Precipitação ..... 100

Figura 7.5 Comparação da Produtividade Primária Bruta (PPB) observada em Petrolina-2011 na resolução horária com os métodos aplicados —: a) PPB observada; b) Precipitação; c) PPB obtida com o algoritmo CART; d) PPB não calibrado no INLAND; e) PPB obtida com o algoritmo K-MEANS; f) PPB obtida com a regressão (MLR) ..... 102

Figura 7.6 Dispersão da Produtividade Primária Bruta (PPB) observada e PPB (saída do INLAND) – a. PPB observada e PPB obtida com o algoritmo CART; b) PPB observada e não calibrado no INLAND; c. PPB observado e PPB K-MEANS; d. PPB observada e PPB obtida com a regressão(MLR) ..... 103

Figura 7.7 Troca Líquida do Ecossistema (TLE) - – Petrolina-PE 2011: a. TLE observada; b.Precipitação; c) TLE não calibrada no INLAND; d. TLE obtida com o algoritmo CART; e. TLE obtida com a regressão (MLR); f. TLE obtida com o algoritmo K-MEANS ..... 105

Figura 7.8 Dispersão para Troca Líquida do Ecossistema (TLE) observada e TLE (saídas do INLAND) em Petrolina-PE 2011 a) TLE observada x TLE obtida com o algoritmo CART; b) TLE observada x TLE modo não calibrado no INLAND; c) TLE observada x TLE obtida com o algoritmo K-MEANS; d) TLE observada x TLE obtida com a regressão (MLR) ..... 106

Figura 7.9 – Balanço de energia (Rn) Petrolina-PE 2011 - Comparação de balanço de energia (Rn) observado com as saídas do INLAND: a. Rn Observado; b. Rn obtido com o algoritmo CART, c. Diferença entre Rn observado e Rn obtido com o CART; d. Rn não calibrado; e. Diferença entre Rn observado e Rn não calibrado no INLAND; f. Rn obtido com o algoritmo K-MEANS, g. Diferença entre Rn observado e Rn obtido com o algoritmo K-MEANS; h. Rn obtido com a

regressão (MLR); i. Diferença entre Rn observado e Rn obtido com a regressão (MLR) .....	108
Figura 7.10 Dispersão para Rn observado e Rn (saídas do INLAND); a) Rn observado x Rn obtido com o CART; b. Rn observado x Rn obtido com o K-MEANS; c. Rn observado x Rn obtido com a regressão (MLR); d. Rn observado x Rn obtido no INLAND não calibrado .....	109
Figura 7.11 Calor sensível (H) Petrolina-PE 2011 – a) H observado; b) H obtido pelo algoritmo CART; c) Diferença entre H observado e H CART; d) H não calibrado; e) Diferença entre H observado e H não calibrado; f) H obtido pelo algoritmo K-MEANS; g) Diferença entre H observado e H K-MEANS; h) H obtido pela regressão (MLR); i) Diferença entre H observado e H MLR .....	110
Figura 7.12 Dispersão para H observado e H (saídas do INLAND) Petrolina-PE 2011: a. H observado x H obtido pelo algoritmo CART; b. H observado x H obtido pelo algoritmo K-MEANS; c. H observado x H obtido pela regressão (MLR); d. H não calibrado no INLAND .....	111
Figura 7.13 Calor latente (LE) Petrolina-PE 2011 – a) LE observado; b) LE obtido pelo algoritmo CART; c) Diferença entre LE observado e LE CART; d) LE não calibrado no INLAND; e) Diferença entre LE observado e LE não calibrado no INLAND; h) LE obtido com regressão (MLR); i) Diferença entre LE observado e LE obtido com a regressão (MLR) .....	112
Figura 7.14 Dispersão para LE observado e LE (saídas do INLAND) Petrolina-PE 2011. a. LE observada x LE obtida pelo algoritmo CART; b. LE observada x LE obtida pelo algoritmo K-MEANS; c. LE observada x LE obtida pela regressão (MLR); d. LE observada x LE não calibrado no INLAND .....	113
Figura 7.15 Cenário de PPB para Petrolina.....	115
Figura 7.16 Cenário de PPB para o Nordeste brasileiro.....	115
Figura 7.17 Cenário de EUA para Petrolina-PE .....	116
Figura 7.18 Cenário de EUA para Petrolina-PE .....	116
Figura 7.19 – Cenários de Produtividade Primária Líquida (PPL) (Gt C ano) do ano 2016 a 2100 de acordo com as RCPs 2.6, 4.5, 6 e 8.5 do IPCC(WAYNE, 2013): a) PPL 2016 RCP 2.6; b) PPL 2058 RCP 2.6; c) PPL 2100 RCP 2.6; d) PPL 2016 RCP 4.5; e) PPL 2058 RCP 4.5; f) PPL 2100 RCP 4.5; g) PPL 2016 RCP	

6; h) PPL 2058 RCP 6; i) PPL 2100 RCP 6; J) PPL 2016 RCP 8.5; k) PPL 2058 RCP 8.5; L) PPL 2100 RCP 8.5 .....	118
Figura 7.20 Comparação de $V_{cmax}$ definido para diversos modelos para o TFP: arbustos decíduos e dados de $V_{cmax}$ observados (Bonan et al., 2011) e observados na Caatinga (todos os valores obtidos nas campanhas em Petrolina-PE).....	120

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – DGVMs e principais processos fisiológicos .....	31
Tabela 3.2 - Tipos Funcionais de Plantas definidos no INLAND .....	41
Tabela 3.3 – TFPs e parâmetros ecofisiológicos na forma padrão do INLAND.....	42
Tabela 4.1 Tratamentos nas OTCS .....	44
Tabela 4.2 Posicionamento dos indivíduos de Catingueira .....	58
Tabela 4.3 – Alocação de biomassa.....	67
Tabela 4.4 - Concentrações atmosféricas iniciais de CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> .....	67
Tabela 4.5 <i>Representative Concentration Pathways</i> (RCPs) .....	68
Tabela 5.1 Parâmetros de trocas gasosas obtidos nas curvas AxPAR e AxCi das plantas de <i>P. microphylla</i> sob 4 tratamentos em relação à densidade de CO <sub>2</sub> na atmosfera e estresse hídrico .....	73
Tabela 6.1 – Potencial hídrico ( $\psi$ ) e Assimilação líquida ( $A_n$ ) dos 11 indivíduos de <i>P. microphylla</i> em Petrolina-PE.....	87
Tabela 6.2 Dados utilizados na inferência do $V_{c_{max}}$ para as campanhas de 2013 e 2014, em Petrolina .....	89
Tabela 7.1 Porcentagem de ocorrências para cada classe (folha) de $V_{c_{max}}$ utilizando a calibração pelo CART .....	97
Tabela 7.2 - Centroides de cada atributo obtidos com o algoritmo K-MEANS .....	97
Tabela 7.3 Resultados de classificação de $V_{c_{max}}$ através de K-MEANS.....	97
Tabela 7.4 Comparação de resultados para EUA .....	114



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- CPATSA: Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido
- CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- DGVMs: Modelos de Vegetação Global Dinâmica, do inglês: *Dynamic Global Vegetation Models*
- EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- ENOS El Niño Oscilação Sul
- ESMs: Modelos do Sistema Terrestre - do inglês: *Earth System Models*
- EUA: Eficiência do Uso da Água
- EUN: Eficiência do Uso do Nitrogênio
- FACE: Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment
- Fortran: *Formula Translation* – linguagem de programação
- FvCB: modelo bioquímico de assimilação fotossintética (FARQUHAR, von CAEMMERER, BERRY, 1980).
- GMT – Hora média de Greenwich (Greenwich Mean Time)
- IAF Índice de Área Foliar
- IIASA Instituto Internacional para a Análise de Sistemas Aplicados
- IBIS *Integrated Biosphere Simulator*
- INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPCC Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. Do inglês: *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- IPCC – AR5 -Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – (*Fifth Assessment Report (AR5)*)

LAFIECO - Laboratório de Fisiologia Ecológica de Plantas do Instituto de Biociências da USP

MMA Ministério do Meio Ambiente

MCGA Modelos de Circulação Global da Atmosfera

NEB Nordeste do Brasil

NOAA *National Oceanic and Atmospheric Administration*

OTC: câmara de topo aberto, do inglês: *open top chamber*

PAR: radiação fotossinteticamente ativa. Do inglês: *Photosynthetically active radiation*

PPB Produtividade Primária Bruta

PPL Produtividade Primária Líquida

PDSI Índice de Severidade de Seca Palmer – do inglês: *Palmer Drought Severity Index*

RCP *Representative Concentration Pathways*

Rn Balanço de energia – do inglês: *net radiation*

SE Erro padrão da média

TBMs Modelos Biogeoquímicos Terrestres

TLE Troca Líquida do Ecossistema

TFP Tipo Funcional de Planta

UNCCD *United Nations Convention to Combat Desertification*

USP Universidade de São Paulo

ZCIT Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A** assimilação de CO<sub>2</sub> pela fotossíntese ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- A<sub>n</sub>** assimilação líquida de CO<sub>2</sub> pela fotossíntese ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- aleaf** coeficiente de alocação de biomassa foliar
- aroot** coeficiente de alocação de biomassa das raízes
- awood** coeficiente de alocação de biomassa do tronco
- c<sub>i</sub>** concentração intercelular de CO<sub>2</sub>
- [CO<sub>2</sub>]** concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera
- g<sub>s</sub>** condutância estomática ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- Γ\*** ponto de compensação de CO<sub>2</sub>
- ψ** potencial hídrico das plantas (MPa)
- specla** área foliar específica ( $\text{m}^2 \text{ Kg}^{-1}$ )
- turnover** fim de ciclo e início de outro de produtividade
- tauleaf** turnover de biomassa foliar (anos)
- tauroot** turnover de biomassa das raízes (anos),
- tauwood** turnover de biomassa do tronco (anos)



# SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1.O aumento da concentração de CO <sub>2</sub> na atmosfera e as plantas.....	1
1.2.Semiárido .....	5
1.3.Respostas do semiárido às mudanças globais e ao aumento do CO <sub>2</sub> na atmosfera .....	9
1.4.Respostas de espécies da Caatinga a uma atmosfera de CO <sub>2</sub> enriquecida ...	11
1.5.Modelos de Vegetação Global: calibração e cenários .....	12
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	15
<b>3. ELEMENTOS TEÓRICOS</b> .....	17
3.1.Fotossíntese “a maquinaria fotossintética” .....	17
3.1.1.Processo fotoquímico da fotossíntese .....	17
3.1.2.Processo bioquímico da fotossíntese .....	17
3.2.Modelos de Vegetação Global Dinâmica (DGVMs) .....	20
3.2.1.Definição.....	20
3.2.2.A evolução dos DGVMs.....	21
3.2.2.1.A primeira geração de modelos de vegetação.....	22
3.2.2.2.A segunda geração de modelos de vegetação.....	22
3.2.2.3.A terceira geração de modelos de vegetação.....	25
3.2.3.V <sub>Cmax</sub> nos DGVMs.....	26
3.2.4.A aclimação nos DGVMs .....	27
3.3.O modelo INLAND .....	35
3.3.1.Algumas melhorias do INLAND .....	36
3.3.2.O módulo de fisiologia vegetal.....	37
3.3.3.Condutância estomática no INLAND .....	40
3.3.4.Tipos funcionais de plantas (TFPs) no INLAND .....	41
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	43
4.1.Experimento com alto CO <sub>2</sub> (LAFIECO-USP) .....	43
4.1.1.Cultivo das plantas .....	43
4.1.2.Desenho experimental.....	43
4.1.3.Medidas de crescimento e biomassa.....	46
4.1.4.Análise estatística.....	48
4.2.Trabalho de campo - sítio experimental.....	48

4.2.1.Climatologia e solo .....	49
4.2.2.Dados meteorológicos usados como forçantes do INLAND .....	50
4.2.3.Área de alcance da torre e predominância dos ventos .....	51
4.2.4.Dados utilizados para calcular calor latente, calor sensível e PPB.....	51
4.2.5.Parâmetros extraídos das curvas de luz e CO <sub>2</sub> .....	53
4.2.6.Campanhas .....	56
4.2.7.Escolha do Tipo Funcional de Planta .....	59
4.3.Modelagem .....	60
4.3.1.Definição das variáveis (dependente e independentes) .....	60
4.3.2.Algoritmos de mineração de dados .....	62
4.3.2.1.Classification and Regression Tree (CART) .....	63
4.3.2.2.K-MEANS .....	66
4.3.3.Parametrização de alocação de biomassa .....	67
4.3.4.Parametrização de concentração atmosférica.....	67
4.3.5.Projeções do INLAND seguindo as RCPs .....	68
<b>5. RESULTADOS: EXPERIMENTO EM CÂMARAS DE TOPO ABERTO .....</b>	<b>71</b>
5.1.Resultados do experimento no LAFIECO-USP .....	71
5.2.Condições experimentais .....	71
5.2.1.Trocas gasosas .....	72
5.2.2.Eficiência do Uso da Água (EUA) .....	76
5.2.3.Crescimento e biomassa .....	77
5.3.Discussão .....	84
<b>6. RESULTADOS: EXPERIÊNCIA DE CAMPO NA CAATINGA .....</b>	<b>87</b>
6.1.Campanhas de 2013 e 2014 (Petrolina-PE) .....	87
6.2.Curvas AxCi .....	88
6.3.Discussão .....	92
<b>7. RESULTADOS: APLICAÇÃO EM MODELAGEM DE SUPERFÍCIE .....</b>	<b>95</b>
7.1.Resultados de modelagem .....	95
7.1.1.Regressão Linear Múltipla .....	95
7.1.2.Classification And Regression Tree (CART).....	96
7.1.3.K-MEANS .....	97
7.1.4. Produtividade Primária Bruta (PPB) e Troca Líquida do Ecossistema (TLE) – resolução mensal .....	98
7.1.5. .Produtividade Primária Bruta (PPB) e Troca Líquida do Ecossistema (TLE) - resolução horária - .....	101

7.1.6. Balanço de Energia (Rn), Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) - resolução horária .....	107
7.1.7. Eficiência do Uso da Água (EUA) .....	114
7.1.8. Cenários .....	114
7.1.9. Discussão .....	119
<b>8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>123</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>125</b>
<b>GLOSSÁRIO .....</b>	<b>141</b>
<b>APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO DE REGRAS DO CART .....</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE B – IMPLEMENTAÇÃO DE REGRAS DO K- MEANS .....</b>	<b>145</b>
<b>APÊNDICE C – IMPLEMENTAÇÃO DA EQUAÇÃO OBTIDA DE MLR .....</b>	<b>147</b>



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e as plantas

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), um importante gás de efeito estufa (IPCCa, 2014), está sendo monitorado em Mauna Loa, no Havaí, desde 1958 num experimento que é conduzido pelo *Earth System Research Laboratory - National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), nos Estados Unidos. As amostras coletadas neste laboratório ao longo desses anos mostram o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera no planeta (Figura 1.1). Esses registros mostram um aumento de 0,53% ou 2 ppm por ano, da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> (NOAA, 2014).

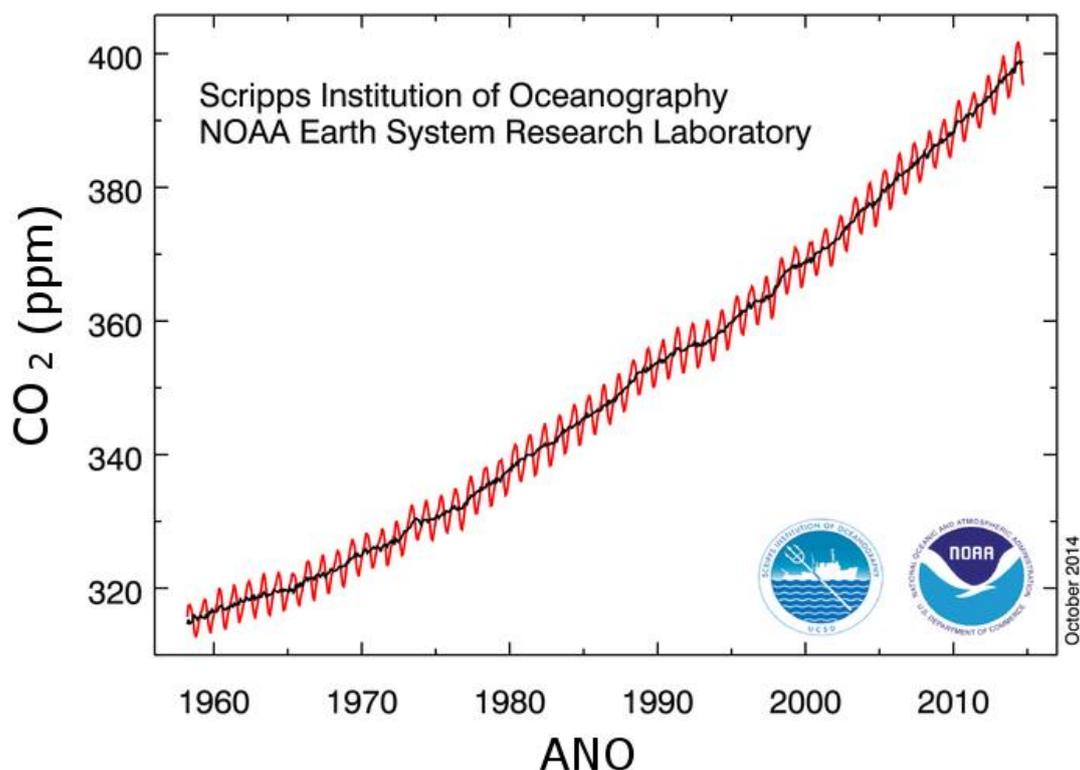


Figura 1.1 Registros da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico realizados em Mauna Loa, no Havaí – médias mensais desde 1958. A linha vermelha representa dados de concentração de CO<sub>2</sub> medidos como a fração molar de ar seco e a curva preta representa a média móvel desses dados.  
Fonte: NOAA (2014).

O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (juntamente com outros gases como vapor d'água, metano, ozônio e óxido nitroso) contribui para acentuar o efeito estufa sobre o planeta. O aumento da densidade de gases de efeito estufa faz com que seja retida na atmosfera uma quantidade de calor maior do que é necessária para manter a vida e os ecossistemas em equilíbrio (NAKICENOVIC, SWART, 2014).

O dióxido de carbono também tem um efeito fertilizador sobre os vegetais e a sua assimilação ocorre através do processo fotossintético que converte o carbono inorgânico em carbono orgânico, processo essencial para a vida no planeta (TAIZ; ZEIGER, 2009). Ocorrendo um aumento de concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre como tem sido observado (NOAA, 2014), há uma maior disponibilidade desse gás para as plantas. Isso suscita uma importante questão científica: - qual será a resposta das plantas diante da abundante disponibilidade deste gás, e por consequência, quais serão os efeitos sobre as plantas? Dessa forma, um grande número de estudos abordando essas questões tem sido realizado (STIT, 1991; SIMS et al., 1998; SAGE, 2002; AINSWORTH et al., 2003; AINSWORTH; LONG, 2005; KÖRNER, 2006; AINSWORTH et al., 2007; AINSWORTH; ROGERS, 2007; LEAKEY et al., 2009; DaMATTA et al., 2010; SMITH; DUKES, 2012; HUNTINGFORD et al., 2013, ARENQUE et al., 2014).

Os efeitos e as respostas das plantas ao alto CO<sub>2</sub> atmosférico têm sido estudados através de experimentos controlados em câmaras de topo aberto (OTCs - do inglês *open top chambers*) ou através de *Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment* (FACE) (AINSWORTH; LONG, 2005; AINSWORTH et al., 2007; LEAKEY et al., 2009; ARENQUE et al., 2014). As OTCs (descritas com mais detalhes no Capítulo 6 – Metodologia) são utilizadas para o cultivo de plantas sob concentrações controladas de CO<sub>2</sub> (concentração ambiente e concentração elevada). Por outro lado, o FACE é um sistema também utilizado para experimentos com plantas numa atmosfera com alta concentração de CO<sub>2</sub>, mas diferentemente das OTCs, é realizado num ambiente aberto o que permite

o estudo dos efeitos da alta concentração de CO<sub>2</sub> sobre as plantas e ecossistemas em condições naturais, sem a clausura das câmaras.

A maioria das conclusões sobre os efeitos e as respostas das plantas ao alto CO<sub>2</sub> atualmente conhecidas foram através desses experimentos controlados em OTCs e FACE (AINSWORTH; LONG, 2005). As principais respostas das plantas ao elevado CO<sub>2</sub> são mostradas na Figura 1.2 e uma delas é o aumento da taxa fotossintética diante de uma maior disponibilidade de CO<sub>2</sub> atmosférico. Havendo aumento de fotossíntese, há também aumento do transporte de elétrons, pois eles participam na síntese de ATP (adenosina trifosfato, nucleotídeo responsável pela energia utilizada no processo fotossintético) e também ocorre aumento de respiração. Como efeitos negativos (diminutivos) ocorrem na raiz a diminuição da condutância estomática e da transpiração, pois os estômatos reduzem a abertura diante da maior disponibilidade de CO<sub>2</sub> e por consequência, ocorre menos perda de água pelas plantas. Efeitos secundários podem ser descritos como o aumento na assimilação de carbono, e assim ao nível da folha vai haver acúmulo de amido, aumento de área foliar e biomassa, maior crescimento da raiz, uma maior tolerância ao estresse e maior fertilidade. Como efeito negativo, ocorre a diminuição de nitrogênio e nutrientes minerais na associação com a micorrizas (associação de fungos e raízes de plantas) (SAGE, 2002). E também pode ocorrer a inibição da expressão de genes o que leva a uma diminuição de proteína fotossintética: genes que codificam rubisco (enzima responsável pela carboxilação), complexos clorofila-proteína do complexo antena e proteínas de transporte de elétrons do cloroplasto. Todos os componentes no processo vão refletir no balanço (ou status) de água e carboidratos da planta (SAGE, 2002; AINSWORTH; LONG, 2005).

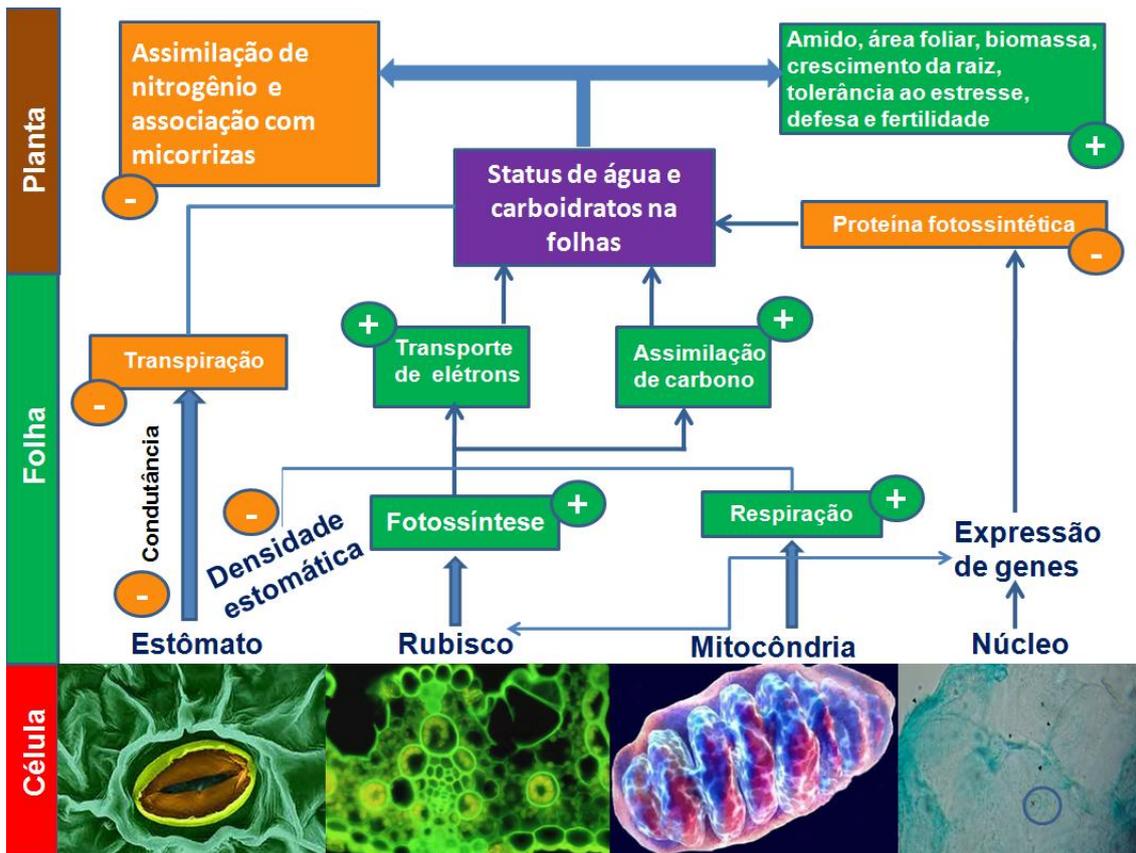


Figura 1.2 – Principais respostas das plantas a uma elevada concentração de CO<sub>2</sub>, o sinal (+) indica efeitos positivos e (-) indica efeitos negativos.

Fonte: Adaptada de Buckeridge et al. (2008) e Sage (2002).

Alterando o balanço de água e carboidratos na planta, pode-se supor que isto vai refletir sobre os ecossistemas em questões de biomassa, produção primária bruta (PPB), produção primária líquida (PPL), troca líquida do ecossistema (TLE) e total de nitrogênio e carbono no solo (ROGERS et al., 2009; AINSWORTH et al., 2007).

Os efeitos e as respostas das plantas ao alto CO<sub>2</sub> atmosférico também são questões relevantes para a predição de cenários futuros na produção de alimentos e para a segurança alimentar. O efeito do alto CO<sub>2</sub> sobre a fisiologia das plantas é uma das maiores fontes de incertezas nos modelos executados pelo Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPPC AR5). Diversas culturas como a soja, arroz, feijão, milho e cana de açúcar podem responder com um aumento da produtividade como

resultado da fertilização do CO<sub>2</sub> e melhor eficiência do uso da água. Se melhorias tecnológicas são consideradas, a produtividade do feijão e do milho pode aumentar entre 40% e 90% (COSTA et al., 2009a). No entanto, DaMATTA et al., (2010) comentam que a qualidade dos alimentos pode diminuir devido ao teor de açúcar mais elevado em grãos e frutas e a diminuição do teor de proteína dos cereais e legumes.

Desta forma, há uma série de implicações para a vegetação diante de uma atmosfera num ambiente de mudanças globais. Uma atmosfera com elevado CO<sub>2</sub> irá repercutir tanto nos ecossistemas como no cultivo e na produção agrícola. Isto reforça a importância e relevância de estudos dentro deste escopo pela comunidade científica internacional.

## **1.2. Semiárido**

O semiárido brasileiro é um dos mais povoados do mundo, sendo que 27 milhões de pessoas (população urbana e rural) vivem na região, a maioria carente e dependente dos recursos do bioma para sobreviver (GARIGLIO et al., 2010; MMAa, 2014). Grande parte da população que vive nesta região tira o sustento de atividades agropastoris e de recursos naturais que é utilizada tanto na geração de energia para indústrias e domicílios, quanto para a obtenção de produtos florestais não madeireiros, a exemplo da forragem animal, mel, frutos, fibras, remédios, cosméticos e outros que se tornam alternativas de geração de renda para muitas famílias (MMA, 2010). Estas atividades são altamente dependentes de chuva, e sofrem fortes reveses devido às adversidades climáticas e aos ciclos de seca acentuados. Além da escassez de água, boa parte dos solos também é deficiente de nutrientes como nitrogênio, fósforo e cálcio, o que contribui para limitar ainda mais a produtividade agropecuária. O semiárido brasileiro é afetado de forte insolação e ocorrem temperaturas relativamente altas (médias anuais entre 23<sup>0</sup>C a 27<sup>0</sup>C), regime de chuvas marcado pela escassez (precipitação anual máxima de 800 mm), evaporação média de 2.000 mm. ano<sup>-1</sup> e umidade relativa do ar em torno de 50% (MMA, 2010). A seca do Nordeste Brasileiro (NEB) tem causas naturais e ocorre

quando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que carrega a umidade da Amazônia, não consegue se deslocar até a região Nordeste no período verão-outono. O ENOS (El Niño Oscilação Sul), um evento que ainda não é bem explicado e que é o aquecimento das águas do Pacífico na costa oeste da América do Sul, também tem influência sobre a seca no NEB. A ocorrência do *El Niño* reflete nas alterações de grande escala sobre a circulação atmosférica associada a circulação Walker deslocada para leste, com o seu ramo ascendente sobre as águas anormalmente quentes do Pacífico Equatorial Leste, e o ramo descendente sobre o Atlântico e o NEB, o que impede a formação de nuvens de chuva (FERREIRA; MELLO, 2005; KAYANO et al., 2009).

O semiárido brasileiro abrange parte de oito estados da Região Nordeste (Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia) e parte do norte do estado de Minas Gerais (Figura 1.3) (SILVA et al., 2010). O semiárido também pode ser definido levando em conta apenas o fator climático, o que segundo Rodal e Sampaio (2002) seria uma forma mais simples. Também pode incluir outras variáveis que compreendem aspectos políticos com as implicações quanto a benefícios fiscais e outras questões econômicas e sociais (MMA, 2010; BRASIL MIN, 2006). Segundo o MMA (2014), o semiárido brasileiro compreende uma área em torno de 969.589 km<sup>2</sup> (MMA, 2014) Km<sup>2</sup> e compreende a Caatinga que é um dos maiores biomas brasileiros.

Quanto à definição da área da Caatinga, há diferentes descrições e delimitações. Rodal e Sampaio (2002) analisaram as implicações de diferentes descrições e identificaram três características básicas, na maioria dos escritos: (i) a vegetação que cobre uma área grande mais ou menos contínua, no NEB, submetida a um clima semiárido, bordejada por áreas de clima mais úmido; (ii) a vegetação desta área, com plantas que apresentam características relacionadas à adaptação à deficiência hídrica (caducifolia, herbáceas anuais, suculência, acúleos e espinhos, predominância de arbustos e árvores de pequeno porte, cobertura descontínua de copas); e (iii) a vegetação com

algumas espécies endêmicas a esta área semiárida e com algumas espécies que ocorrem nesta área e em outras áreas secas mais distantes, mas não nas áreas circunvizinhas (MMA, 2010).

A Caatinga também é extremamente importante do ponto de vista biológico e ressalta-se a sua resiliência: as espécies nativas perdem suas folhas durante a estação seca como uma estratégia para enfrentar a perda de água e têm tolerância a reduzido potencial hídrico. O xilema da maioria destas espécies tolera alta pressão negativa que pode chegar a -6,0 MPa durante o período seco (SANTOS et al., 2014).



Figura 1.3 – O semiárido brasileiro com o mapa da Caatinga.

Fonte: Araujo Filho (2011)

Dentre os biomas brasileiros, a Caatinga é o menos conhecido cientificamente e vem sendo tratado com baixa prioridade, apesar de ser um dos mais ameaçados, devido ao uso inadequado e insustentável dos seus solos e recursos naturais.

A Caatinga sofre o grave problema da desertificação. A desertificação é entendida como a degradação da terra nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de vários fatores, incluindo as variações climáticas e as atividades humanas. O Governo do Brasil é um dos signatários da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação nos Países Afetados por Seca Grave e/ou Desertificação, particularmente na África (UNCCD) a partir de 1997 (MMA Desertificação, 2014). Segundo Sampaio et al. (2005), a área onde pode ocorrer desertificação está razoavelmente bem definida. É aquela na qual a razão entre precipitação e evapotranspiração potencial anuais fica abaixo de 0,65.

Ainda segundo Sampaio et al. (2005), a desertificação é causada por uma interação complexa de fatores físicos, biológicos, políticos, sociais, culturais e econômicos que costuma progredir em fases: 1) desmatamento; 2) degradação do solo; 3) redução da produção e da renda agropecuária; e 4) a deterioração das condições sociais. A erosão é a mais grave causa de degradação do semiárido Nordeste, por sua irreversibilidade, pela grande extensão de solos rasos, pela ocorrência de chuva de alta intensidade e pela agricultura em áreas de alta declividade.

Junto às fases citadas acima, ocorrem uma série de eventos e práticas correlacionadas que também são causadores de desertificação: queimadas, perda de matéria orgânica, sobrepastoreio, compactação do solo, extrativismo predatório, redução da fertilidade, contaminação das águas, irrigação inadequada, práticas agrícolas inadequadas, baixa produtividade, baixa renda, pouco capital e salinização do solo (SILVA et al., 2010).

A desertificação ainda leva a um grave problema social que é a migração, o abandono da área rural. Estima-se que entre 1991 e 2000, um milhão de pessoas deixou as áreas suscetíveis de desertificação (SILVA et al., 2010). Esse processo em parte se reverteu no início do século XXI, quando foi observada a expansão da vegetação no nordeste do Brasil, o que pode ser atribuída às políticas de previdência e assistência social, sendo que quando

melhoram as condições socioeconômicas de uma população, observa-se uma menor degradação ambiental (AIDE et al., 2012).

### **1.3. Respostas do semiárido às mudanças globais e ao aumento do CO<sub>2</sub> na atmosfera**

Apesar de se esperar que as regiões áridas estejam aumentando devido às mudanças globais, principalmente pela diminuição da precipitação e ao aumento da evaporação, algumas publicações recentes têm questionado se de fato isto está ocorrendo (SHEFFIELD et al., 2012; DONOHUE et al., 2013; SANTOS et al., 2014). Um aumento de áreas verdes nas regiões áridas e semiáridas em diferentes continentes é confirmado pela análise de imagens de satélites relacionadas ao período de 1982 a 2010, apesar de ocorrerem secas mais prolongadas em algumas dessas regiões como no semiárido brasileiro (DONOHUE et al., 2013). Ainda segundo Donohue et al. (2013), isto pode ser atribuído ao aumento da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>, possibilitando um maior sequestro de carbono pelas plantas e menor perda de água devido ao fechamento dos estômatos, ocorrendo assim, uma maior eficiência do uso da água (EUA). Outro exemplo de aumento de áreas verdes causado pelo efeito fertilizador do CO<sub>2</sub> atmosférico é relatado por Buitenwerf et al. (2012) que mostraram que a densidade de árvores aumentou o dobro num período de meados dos anos 1990 a 2010 numa savana semiárida na África do Sul.

Sheffield et al. (2012) consideram que as regiões áridas e semiáridas pouco mudaram nos últimos 60 anos. Os autores fazem uma crítica ao Índice de Severidade de Seca Palmer (PDSI) que tem sido muito utilizado e tem mostrado a diminuição global da umidade e o aumento da seca no mundo. No entanto, esses autores consideram o PSDI pouco realista, pois o seu cálculo é feito a partir do balanço hídrico tendo como forçantes apenas dados mensais de temperatura e precipitação. Este cálculo é considerado muito simplista e não leva em conta outras forçantes como a disponibilidade de energia, umidade do ar e velocidade do vento (SHEFFIELD et al., 2012). A falta de consistência do PDSI explicaria porque a reconstrução da seca paleoclimática

através deste índice diverge da reconstrução que foi realizada através de anéis de árvores (SHEFFIELD et al., 2012).

Ainda há divergências entre os grupos que discutem o sequestro de carbono em florestas tropicais secas (PRINCE et al., 2007). Rotenberg e Yakir (2010) consideram que a vegetação em áreas áridas é incapaz de mitigar o efeito de gases estufa. O aumento da mortalidade de espécies de árvores ao redor do mundo, especialmente em florestas úmidas, mas também ocorrendo em florestas secas foi relatado por Phillips et al. (2010). As causas dessas situações têm sido discutidas no mundo, contudo sem haver consenso em parte devido às diferentes metodologias aplicadas nos experimentos e nos estudos (BÜNTGEN; SCHWEINGRUBER, 2010; SANTOS et al., 2014).

Campos et al. (2013) comentam que secas recentes na América do Norte, África, Europa, Amazônia e Austrália são reconhecidas como uma considerável mudança da variabilidade climática no final do século XX. E para o século XXI os modelos projetam um aumento das regiões áridas e secas permanentes para a maior parte da África, sul da Europa e Oriente Médio, Américas, Austrália e sudeste da Ásia. Os autores argumentam que os modelos também preveem mudanças na produtividade da vegetação e isso deve afetar a segurança alimentar e o sustento básico. No entanto, Campos et al. (2013) descobriram uma maior eficiência do uso da água (EUA) nos períodos mais secos para todos os biomas estudados. Nos anos mais úmidos essa EUA é significativamente menor. Esta descoberta implicará numa alteração conceitual nos modelos em relação aos ecossistemas em escala decadal e na previsão das condições hidroclimáticas e irá principalmente contribuir para a predição dos limites de resiliência dos ecossistemas (CAMPOS et al., 2013).

Santos et al. (2014) comentam que a falta de estudos multidisciplinares na Caatinga favorecem conclusões exageradas sobre as consequências das mudanças climáticas no semiárido. Os autores sugerem que a alta resiliência da vegetação nativa da Caatinga é capaz de suportar longos eventos de seca e altas temperaturas. Também demonstram a grande capacidade de resistência

de espécies nativas quando durante a seca de 2012-2013 (a mais severa nos últimos 50 anos) a umidade do solo em 2012 estava próxima de 0%, e algumas espécies como a *Poincianela pyramidalis* ainda assimilavam em torno de  $5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  pela manhã. A resposta rápida desta espécie foi registrada quando após forte chuva em abril de 2013, a assimilação subiu em torno de  $32 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Baseando-se nesses dados de ecofisiologia coletados em campo, os autores acreditam que algumas espécies da Caatinga estão preparadas para resistir em severos períodos de seca, e somente não poderão suportar práticas insustentáveis que podem afetar de forma irreversível esse bioma.

#### **1.4. Respostas de espécies da Caatinga a uma atmosfera de CO<sub>2</sub> enriquecida**

Uma questão importante a ser estudada é a resposta da vegetação da Caatinga a uma atmosfera de alta concentração de CO<sub>2</sub>. Diante de sua biodiversidade e da dependência da população que vive dos recursos que a vegetação provê, qual seria resposta deste bioma brasileiro diante das mudanças globais?

Poderia ocorrer um processo de fertilização como descrito na Seção anterior, ou então, uma mortandade de espécies diante do aumento da temperatura e a diminuição de precipitação.

Assim são diversas variáveis que compõem a complexidade desta questão, no entanto, este trabalho foi focado apenas sobre a resposta da Caatinga a uma elevada concentração de CO<sub>2</sub>. Procurou-se verificar questões como o ganho de biomassa e a Eficiência do Uso da Água (EUA), sendo que a EUA é um fator bastante favorável para que se considere a resiliência da Caatinga diante das mudanças globais (SANTOS et al., 2014).

As respostas das plantas a uma alta concentração de CO<sub>2</sub> ainda é uma questão que tem sido muito discutida (STIT, 1991; SIMS et al., 1998; SAGE, 2002; AINSWORTH et al., 2003; AINSWORTH; LONG, 2005; KÖRNER, 2006;

AINSWORTH et al., 2007; AINSWORTH; ROGERS, 2007; LEAKEY et al., 2009; DaMATTA et al., 2010; ARENQUE et al., 2014). No entanto, para nosso conhecimento ainda não existem estudos para a Caatinga. O trabalho também inclui uma componente observacional através de um experimento com o cultivo de uma espécie representativa da Caatinga numa concentração atmosférica enriquecida, em laboratório. Neste trabalho foi observada a Eficiência do Uso da Água (EUA), assimilação de carbono, o ganho de biomassa e o crescimento de plantas cultivadas numa atmosfera com alta concentração de CO<sub>2</sub>.

### **1.5. Modelos de Vegetação Global: calibração e cenários**

Uma forma de estimar cenários futuros para os biomas e a vegetação é através dos Modelos de Vegetação Globais Dinâmicos (DGVMs). Os DGVMs foram criados como uma forma de complementar os Modelos de Circulação Global da Atmosfera (MCGAs) que não consideravam a interação da atmosfera com a vegetação. Os DGVMs procuram representar os processos de superfície (transferência de energia, água, CO<sub>2</sub> e momentum); vegetação: fenologia; a produtividade primária bruta (PPB) e líquida, respiração (PPL), a fisiologia da planta, condutância estomática e dinâmica de solo (ciclos de carbono e nitrogênio, nutrientes, respiração terrestre e decomposição de matéria orgânica), a fisiologia da planta e condutância estomática (KUCHARIK et al, 2000; ARORA; BOER, 2006).

No entanto, os DGVMs apresentam muitas incertezas que têm origem na fisiologia de plantas (LeBAUER et al., 2013; HUNTINGFORD et al., 2013; ROGERS, 2014; DIETZE, 2014). Algumas destas incertezas são enumeradas a seguir:

1. Medidas de  $V_{c_{max}}$  ao nível de dossel cujos valores são mais baixos do que os medidos ao nível da folha (SCHAEFER et al., 2012; DIETZE, 2014). A velocidade máxima de carboxilação ( $V_{c_{max}}$ ) é o processo pelo qual a Rubisco catalisa RuBP com o CO<sub>2</sub> para produzir os compostos de carbono que, eventualmente, tornar-se-ão fosfatos de triose. A  $V_{c_{max}}$  é considerada um dos parâmetros mais críticos para os

DGVMs diante das mudanças globais, pois tem um impacto direto sobre a produtividade primária bruta (PPB) o que torna bastante relevante na predição de cenários futuros da vegetação (BONAN et al, 2012; LeBAUER et al, 2013; ROGERS, 2014; DIETZE, 2014). Tendo um  $V_{c_{max}}$  medido ao nível do dossel, os modelos tendem a subestimar a PPB (BONAN et al, 2012;. DIETZE, 2014).

2. Há uma grande variação de  $V_{c_{max}}$  para TFPs idênticos e que tentam estimar a absorção de  $CO_2$  para os mesmos biomas, o que é considerado crítico devido à importante função do  $V_{c_{max}}$  no ciclo do carbono (ROGERS, 2014). As variações maiores são no Ártico e nas regiões tropicais, sendo que muitas vezes esses dados estão ausentes. Essa variação de  $V_{c_{max}}$  influencia as saídas dos modelos e Wang et al. (2014), por exemplo, relatam divergências na magnitude e no sinal (positivo e negativo) nas saídas de PPB dos modelos.

3. Outro ponto crítico observado nos DGVMs é o de que utilizam alguns parâmetros estáticos e isto implica que não podem se ajustar às mudanças ambientais (SMITH; DUKES, 2012).

4. Falta de clareza na origem dos valores de  $V_{c_{max}}$  em alguns modelos é outra crítica aos DGVMs (ROGERS, 2014).

5. Uma base de dados de fisiologia de plantas mais abrangente (os dados ainda são escassos) poderá contribuir para calibrar e corrigir esses modelos, incluindo obviamente a  $V_{c_{max}}$ , e reduzir substancialmente as incertezas que atualmente são relatadas nos DGVMs (LeBAUER et al. 2013; HUNTINGFORD et al., 2013; ROGERS, 2014; DIETZE, 2014).

Este trabalho procurar melhorar a representatividade da PPB para a Caatinga através da calibração do  $V_{c_{max}}$  utilizando dados de fisiologia de plantas obtidos em campo.



## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi aprimorar o entendimento das respostas ecofisiológicas da vegetação da Caatinga em relação à atual concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> e a uma concentração atmosférica elevada de CO<sub>2</sub>.

Os objetivos específicos são:

1) criar uma base de dados ecofisiológicos observados que podem ser utilizados para aprimorar as simulações da Caatinga com o modelo de vegetação dinâmica INLAND. Esses dados são de relevante importância para o entendimento da ecofisiologia de espécies nativas deste bioma, bem como para a calibração de modelos do sistema terrestre em regiões tropicais.

2) calibrar a velocidade máxima de carboxilação ( $V_{c_{max}}$ ) para o Tipo Funcional de Planta (TFP) **arbusto decíduo** no modelo INLAND para a Caatinga através de medidas realizadas em campo (em área de mata preservada) utilizando uma espécie representativa da região (*P. microphylla*) e a aplicação de alguns algoritmos computacionais de mineração de dados, além de regressão linear múltipla.

3) estudar respostas da vegetação da Caatinga a uma concentração atmosférica elevada de CO<sub>2</sub>, através da realização de um experimento para a mesma espécie que foi estudada em campo (*P. Microphylla*) cultivando indivíduos em Câmaras de Topo Aberto (OTCs) em concentração elevada de CO<sub>2</sub> atmosférico e concentração ambiente de CO<sub>2</sub> atmosférico. Procurou-se verificar e analisar a assimilação de carbono e a Eficiência do Uso da Água (EUA) nestas condições.



### **3. ELEMENTOS TEÓRICOS**

#### **3.1. Fotossíntese “a maquinaria fotossintética”**

Pode-se dizer que os processos e componentes que participam da fotossíntese são interdependentes e atuam de forma sincronizada, por isso se atribui o termo “maquinaria fotossintética” como uma analogia à produção industrial (BUCKERIDGE et al., 2008). Os limitantes no processo fotossintético podem ser no transporte de elétrons ou nos nutrientes, como na limitação do fosfato inorgânico (Pi) (BUCKERIDGE et al., 2008; TAIZ; ZEIGER, 2009). Basicamente, a fotossíntese em plantas consiste de dois processos acoplados: fotoquímico e bioquímico que são sucintamente explicados a seguir.

##### **3.1.1. Processo fotoquímico da fotossíntese**

No processo fotoquímico (Figura 3.1), os fótons provenientes da luz são absorvidos pelo complexo antena que é composto por clorofilas, pigmentos acessórios e proteínas. Os fótons absorvidos excitam as moléculas de clorofila que liberam energia. O complexo antena transfere essa energia de excitação para centros de reação dos fotossistemas I e II. Parte dos elétrons dessa energia é utilizada na oxidação de H<sub>2</sub>O que ocorre no fotossistema II. Na oxidação é liberado oxigênio molecular, elétrons e prótons. Os elétrons serão utilizados na redução de NADP<sup>+</sup> a NADPH (ver Glossário). Os prótons participarão da força motriz na síntese do ATP a partir do ADP e do fosfato inorgânico (Pi). O ATP que armazena energia em suas ligações químicas e NADPH serão utilizados no ciclo de redução do carbono (Ciclo de Calvin) que é a parte bioquímica da fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2009).

##### **3.1.2. Processo bioquímico da fotossíntese**

No ciclo de Calvin, CO<sub>2</sub> e água do ambiente são combinados enzimaticamente para gerar carboidratos. Há três estágios: carboxilação, redução e regeneração (Figura 3.1). No primeiro estágio, a carboxilação, moléculas de CO<sub>2</sub> reagem com moléculas de ribulose-1,5 bisfosfato (RuBP - molécula aceptora contendo 5 átomos de carbono) para gerar moléculas do intermediário fosfoglicerato.

Essa reação é catalisada pela enzima rubisco (ribulose bisfosfato carboxilase/oxigenase) localizada no cloroplasto. No segundo estágio, ocorre a redução do fosfoglicerato, produzindo carboidratos (sacarose, amido). E no terceiro, ocorre a regeneração do aceptor de CO<sub>2</sub>, ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP). O ciclo de Calvin é um processo que regenera os seus próprios componentes bioquímicos (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Como se observa na Figura 3.1, há duas vias para a entrada de carbono no ciclo de Calvin: a via C<sub>3</sub> e a via C<sub>4</sub>. Para as plantas da via C<sub>3</sub> (soja, tabaco, feijão), tem um início de compostos de 3 carbonos que são utilizados pela ribulose. Nas plantas C<sub>4</sub> (cana-de-açúcar, milho), o CO<sub>2</sub> é fixado inicialmente nas células do mesofilo pela enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPc) em ácidos de 4 carbonos antes de ser capturado pela rubisco (BUCKERIDGE et al., 2008).

A fotossíntese pode ter fatores limitantes na sua produção que pode ser no transporte de elétrons (A<sub>j</sub>), na carboxilação quando não ocorre a regeneração da Rubisco (A<sub>c</sub>) (FARQUHAR et al., 1980, COLLATZ et al., 1991), ou quando não há não há fosfato inorgânico (Pi) suficiente nos cloroplastos para a síntese de ATP (TAIZ; ZEIGER, 2009).

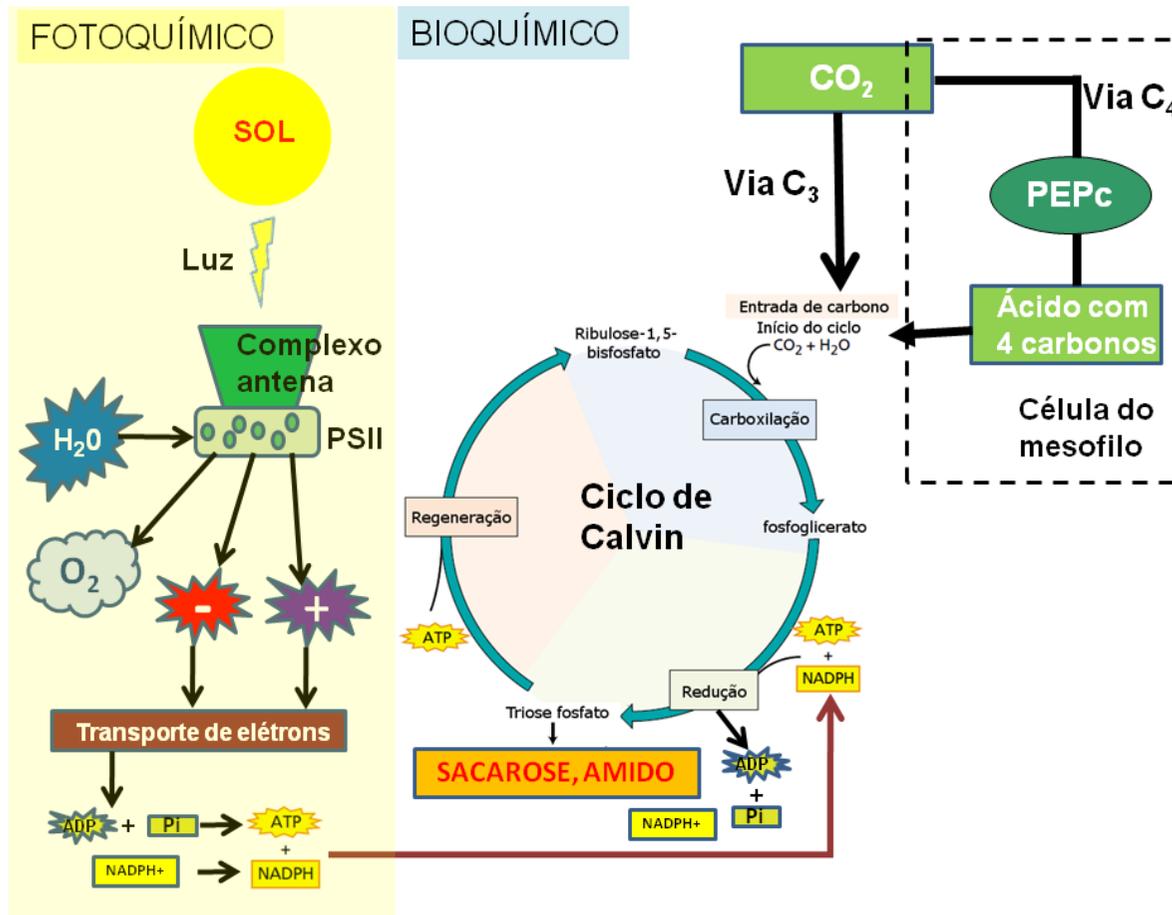


Figura 3.1 – Processos fotoquímico e bioquímico da fotossíntese no cloroplasto.

Fonte: Adaptada de Buckeridge et al. (2008) e Taiz; Zeiger (2009)

Nas plantas  $C_4$  há uma mudança morfológica que é a bainha vascular, uma camada adicional de células (Figura 3.2). Na bainha vascular, a pressão parcial de  $CO_2$  é em torno de 1500  $\mu\text{bar}$ , enquanto no mesofilo é de 150  $\mu\text{bar}$ . Esta situação traz duas grandes vantagens para a rubisco de plantas  $C_4$ : 1) com essa alta concentração de  $CO_2$  na bainha vascular, a planta evita a fotorrespiração que é a captação do oxigênio da atmosfera (21%), enquanto o  $CO_2$  na atmosfera é de 0,038%; 2) as plantas  $C_4$  não necessitam manter os estômatos muito abertos para captar o  $CO_2$  e assim evitam a perda de água. Por outro lado, as plantas  $C_4$  têm a desvantagem de ter um custo energético mais alto do que as plantas  $C_3$  para fixar  $CO_2$ . As plantas  $C_4$  necessitam de cinco ATPs para fixar uma molécula de  $CO_2$  enquanto que as plantas  $C_3$  necessitam de três ATPs.

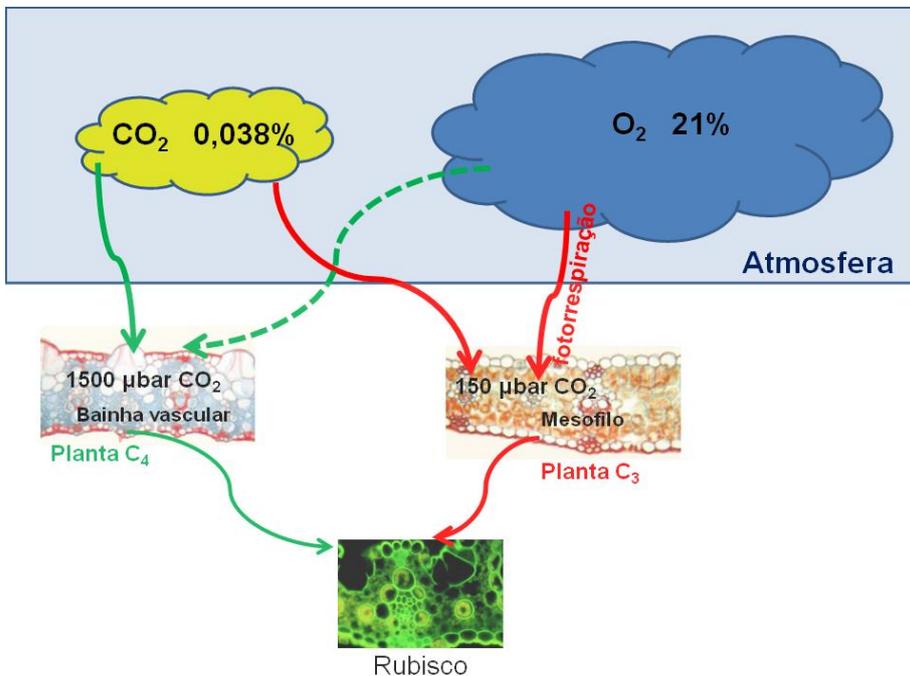


Figura 3.2 Diferença morfológica das plantas  $C_3$  e  $C_4$  (mesofilo e bainha)

### 3.2. Modelos de Vegetação Global Dinâmica (DGVMs)

#### 3.2.1. Definição

Há duas categorias principais de modelos computacionais da vegetação terrestre: os estáticos e os dinâmicos. Os modelos estáticos contribuem no

entendimento do comportamento de um sistema em repouso. De maneira diferente dos modelos estáticos, os modelos dinâmicos ajudam a entender como um sistema muda no decorrer do tempo (FORD, 2009).

Os DGVMs se enquadram na segunda categoria descrita acima e foram desenvolvidos em meados da década de 1990. Os DGVMs vieram complementar os Modelos de Circulação Global da Atmosfera (MCGA) que no princípio representavam de forma bastante precária a interação da atmosfera com a biosfera (SELLERS et al., 1997; PRENTICE et al., 2007). O conceito de DGVMs foi desenvolvido no Instituto Internacional para a Análise de Sistemas Aplicados (IIASA), durante 1988-1990 (PRENTICE et al., 2007). Um requisito básico para que um modelo de vegetação seja considerado dinâmico é que ele deve simular o crescimento, a mortalidade e a competição entre as plantas (ARORA; BOER, 2006; PRENTICE et al., 2007).

As simulações de DGVMs são realizadas espacialmente distribuídas: global, regional ou local. Posteriormente, os DGVMs passaram a representar a mudança do uso da terra por intervenção humana (agricultura, urbanização, desmatamento e manejo florestal) (PRENTICE et al., 2007).

### **3.2.2. A evolução dos DGVMs**

Antes do surgimento dos DGVMs havia apenas os Modelos de Circulação Global da Atmosfera (MCGA) com representação simplificada dos balanços energético e hídrico que foram criados com o objetivo de estimar a circulação global da atmosfera e a troca de fluxos de radiação de calor latente e calor sensível entre a superfície e a atmosfera.

Nos MCGAs, o movimento da atmosfera é definido pelas equações de dinâmica de fluidos e a incorporação de forças mecânicas da gravidade, a rotação da Terra, temperatura e gradientes de pressão causados pela fricção e forças de arraste como o vento na atmosfera inferior (SELLERS et al., 1997).

No entanto, os MCGAs não consideram a interação da vegetação (biosfera) com a atmosfera.

### **3.2.2.1. A primeira geração de modelos de vegetação**

A primeira geração de modelos de vegetação passou a reconhecer explicitamente a influência da vegetação no cálculo do balanço de energia na superfície (DICKINSON et al., 1984; SELLERS et al., 1986) (Figura 3.6). Enquanto nos MCGAs, a vegetação era vista apenas como uma folha permeável entre o solo e a atmosfera, sem qualquer interação, a primeira geração dos modelos de vegetação procuram representar a interação do sistema solo-vegetação e como a superfície interage com a atmosfera. Basicamente, os modelos biofísicos começam a considerar as seguintes interações:

- Absorção de radiação, as propriedades espectrais das folhas e as múltiplas reflexões entre elas. Os dosséis são altamente absorventes de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), e moderadamente refletiva na faixa do infravermelho;
- Transferência de momentum: em geral, dosséis têm rugosidade e superfície porosa. A rugosidade contribui para a turbulência. A rugosidade era uma deficiência nos MCGAs pois era tratada com um valor constante de comprimento;
- Modelos passaram a considerar a importância do estômato para fluxos de vapor d'água para o ambiente externo (SELLERS et al., 1997).

No início dos 1980, ocorreram importantes avanços em fisiologia de plantas e bioquímica com os modelos Farquhar et al. (1980) (FvCB), e Collatz et al. (1991) e Collatz et al. (1992) for para plantas C<sub>4</sub>. Este conhecimento foi incorporado em alguns modelos desta geração.

### **3.2.2.2. A segunda geração de modelos de vegetação**

Na segunda geração, os modelos foram implementados com a representação do crescimento, mortalidade e competição entre as plantas, o que caracterizou

o conceito de vegetação dinâmica (PRENTICE et al., 2007). Outro conceito introduzido foi o de Tipos Funcionais de Plantas (TFPs) (BOX, 1981; BOX, 1996). Por exemplo, Biome3 (HAXELTINE; PRENTICE, 1996b) é um modelo de transição porque foi implementado com o conceito de TFP, no entanto, ainda não dinâmico (Figura 3.6). Ainda na segunda geração, surgiram os Modelos Biogeoquímicos Terrestres (TBMs).

O conceito de TFPs basicamente é uma forma de classificar as plantas em grupos observando-se suas características morfológicas, fisiológicas e fenológicas e suas estratégias ecológicas, de como as plantas respondem a fatores ambientais, afetam outros níveis tróficos e influenciam o ecossistema (PÉREZ-HARGUINDEGUY et al., 2013).

Os TFPs são considerados como uma ferramenta importante para a parametrização e simulações de DGVMs acoplados aos modelos atmosféricos globais, pois permitem representar os tipos de plantas mais importantes do mundo; caracterizá-los através de seu comportamento funcional e fornecer uma cobertura geográfica completa da superfície terrestre do planeta (BOX, 1996).

Bugmann et al. (1996) descrevem que o uso de Tipos Funcionais de Plantas (TFPs) permite várias abordagens metodológicas com uma ampla variedade de atributos de plantas. Ainda de acordo com Bugmann et al. (1996), a definição funcional de um tipo de planta depende da escala de interesse e de variáveis a serem analisadas. Körner (1993) comenta que não há nenhuma maneira de evitar um grau de subjetividade nos critérios de classificação de grupos funcionais. Outra questão é a relevância e a precisão que têm uma anticorrelação. Como mostra a Figura 3.3 sobre as complexidades de escala hierárquica: quanto maior o nível de abordagem para a classificação, maior é a relevância como modelagem global. Por outro lado, uma vez que a escala é dirigida para os eventos ao nível de macromolécula, aumenta a precisão das informações, mas diminui a relevância para os DGVMs.

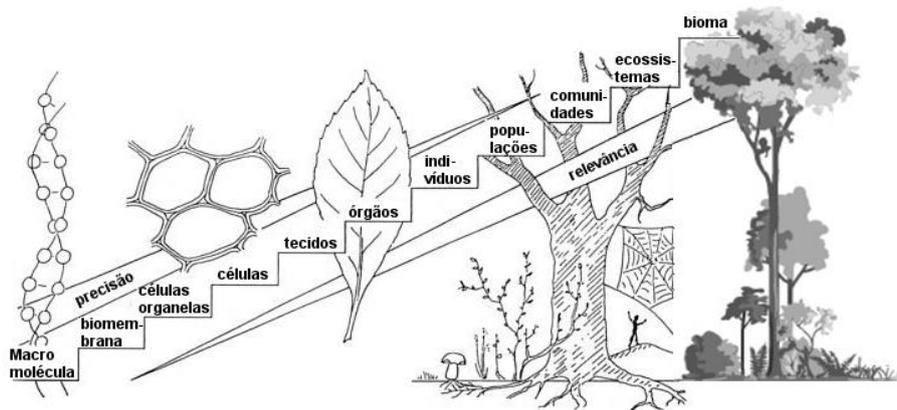


Figura 3.3 Hierarquia de complexidades como critério de definição de tipos funcionais  
 Fonte: adaptada de Körner, C. (1993)

Os Modelos Biogeoquímicos Terrestres (TBMs) são um sub-conjunto de DGVMs (BETHY, ED, MC1, NASA-CASA) que foram originalmente desenvolvidos com o objetivo principal de simular Produtividade Primária Líquida (PPL) utilizando parametrizações mais simples do que o modelo FvCB (PRENTICE et al., 2007). Por exemplo, MC1 (NEILSON, 1995) utiliza regras que buscam uma solução através do Índice de Área Foliar (IAF) biologicamente consistente com a quantidade de água transpirada e as chuvas da estação (NEILSON, 1995). Para evitar exceções que podem levar a resultados absurdos, o modelo utiliza algumas regras ecofisiológicas. Por exemplo, quando o ar e o solo estão muito secos, a condutância estomática é reduzida a um valor próximo a zero.

Outro TBM, o Carnegie Ames Stanford Approach (NASA-CASA) (POTTER; KLOOSTER, 1999) é baseado na hipótese de sucessão de Tilman (1985) que aplica duas condições às espécies: (1) competição das plantas por recursos (água e luz) em períodos relativamente curtos (meses e estações); (2) padrões de períodos longos no suprimento de recursos como água e nutrientes. Desta forma, baseado na produção das plantas como carbono primário e ciclo do nitrogênio, o NASA-CASA foi projetado para acoplar padrões diários e sazonais de mineralização de nutrientes no solo e respiração heterotrófica (POTTER; KLOOSTER, 1999).

Os mais recentes TBMs como BETHY (KNORR, 2000; ZIEHN et al., 2011) e JSBACH utilizam o modelo FvCB para estimar a fotossíntese através de variáveis externas (PRENTICE et al., 2007).

### **3.2.2.3. A terceira geração de modelos de vegetação**

Na terceira geração houve a fusão de alguns modelos como O-CN e SibCASA. No entanto, a principal inovação foi a implementação de alguns processos de aclimatação. Outra inovação foi a utilização de uma abordagem para representar melhor as características de plantas com o objetivo de superar a limitação no baixo de número de TFPs (PAVLICK et al., 2013). Essa abordagem combina aleatoriamente um grande número de estratégias de crescimento cada um deles tendo um conjunto de 15 características de aspectos de funcionamento de planta incluindo alocação de carbono, ecofisiologia e fenologia (PAVLICK et al., 2013).

Apesar de que os DGVMs permitem tratar questões importantes em Ciência do Sistema Terrestre, o conceito de TFPs ainda têm limitações para representar competição e respostas das plantas às condições ambientais. Características de plantas podem ser relacionadas à função das plantas em relação às principais limitações ambientais e essas mesmas características são relevantes à distribuição de espécies ao longo de gradientes climáticos, disponibilidade de nutrientes e distúrbios (LAVOREL et al., 2007). A maioria dos DGVMs que simulam respostas funcionais das plantas são baseados em correlações observadas entre as características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas, reprodutivas ou demográficas das plantas. Entretanto essa abordagem não é suficiente para fazer a predição de mudanças nos ecossistemas originárias na composição de espécies em respostas às mudanças globais (LAVOREL et al., 2007; PAVLICK et al., 2013)

Diante das mudanças globais, tornou-se importante associar espécies que tenham efeitos similares a fatores ambientais como disponibilidade de recursos, CO<sub>2</sub> ou distúrbios a grupos funcionais (LAVOREL et al., 2007). Alguns modelos como JeDi DGVM (PAVLICK et al., 2013) e aDGVM ou

aDGVM2 (SCHEITTER; HIGGINS, 2009; SCHEITTER et al., 2013) surgiram em 2013 com este propósito. Estes modelos utilizam algoritmos computacionais para fazer combinações com características de plantas que permitem múltiplas possibilidades para caracterizar comunidades de plantas, crescimento e competição entre as plantas (Figura 3.6) (Tabela 2.1).

### 3.2.3. $V_{c_{max}}$ nos DGVMs

O parâmetro  $V_{c_{max}}$  é a velocidade máxima do processo de carboxilação em que moléculas de  $CO_2$  reagem com moléculas de ribulose-1,5 bisfosfato (RuBP) para gerar moléculas do intermediário fosfoglicerato. Essa reação é catalisada pela enzima rubisco (ribulose bisfosfato carboxilase/oxigenase). O método para estimar a  $V_{c_{max}}$  é o descrito por Caemmerer; Farquhar (1981) e Caemmerer (2000) (detalhes na Seção 4.2.5). Nos DGVMs, a  $V_{c_{max}}$  é parametrizada com um valor constante para cada Tipo Funcional de Planta (TFP) baseando-se em literatura e no relato de experimentos. (ROGERS, 2014). O modelo BETHY (KNORR, 2000; ZIEHN et al., 2011), por exemplo, utiliza uma base de dados com 723 valores de  $V_{c_{max}}$  (ROGERS, 2014). E os modelos Hybrid (FRIEND, 2010) e Hyland se basearam numa amostra de 45 medidas de três espécies (*Populus tremula*, *Corylus avellana* e *Tilia cordata* (arbustiva)) (KULL; NIINEMETS, 1998) para fazer a inferência de um valor inicial de  $V_{c_{max}}$ . (ROGERS, 2014).

No entanto, esse valor inicial de  $V_{c_{max}}$  obtido em base de dados pode variar de acordo com a disponibilidade de água no solo e/ou com uma função/modelo de disponibilidade de nutrientes, no caso o nitrogênio. Essa função pode ser a de Eficiência do Uso do Nitrogênio (EUN).

Há também alguns DGVMs que não têm o parâmetro  $V_{c_{max}}$  porque não utilizam o modelo FvCB e/ou derivados (Tabela 3.1). Desta forma, os DGVMs podem ser classificados observando-se os seguintes critérios: - a utilização do modelo FvCB e derivados ou não; acoplamento de algum modelo de nitrogênio levando em conta a Eficiência do Uso do Nitrogênio (EUN) na produção

fotossintética; e ainda não utilizar o modelo FvCB. Seguindo estes critérios, a Figura 3.4 mostra a classificação dos modelos.

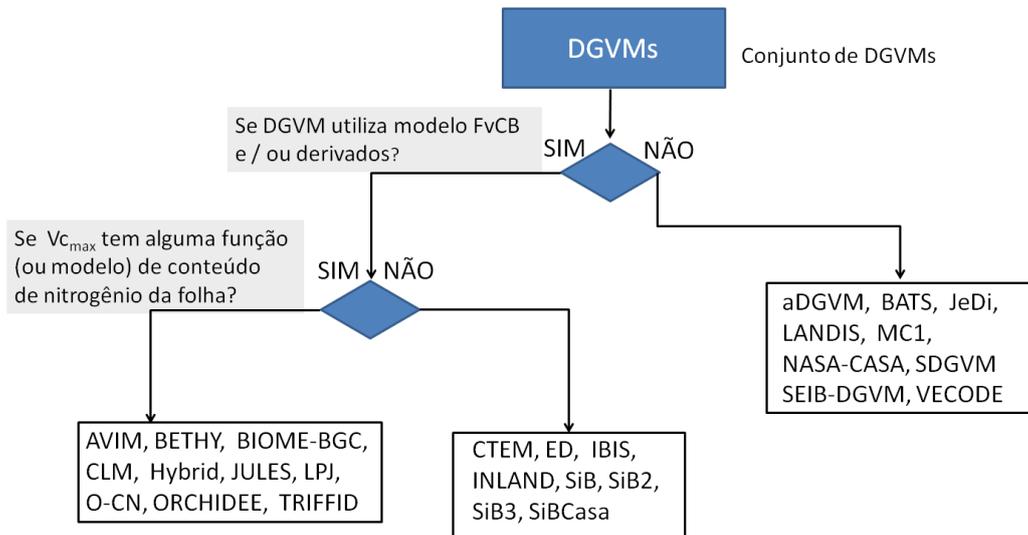


Figura 3.4 Classificação dos DGVMs em relação ao modelo de FvCB e conteúdo de nitrogênio nas folhas

### 3.2.4. A aclimação nos DGVMs

A aclimação é um processo em que ocorre um ajuste fisiológico, estrutural ou bioquímico por uma planta em resposta a um estímulo ambiental induzido que é manifestado como alterações na função de resposta em curto tempo de um processo fisiológico (SMITH; DUKES, 2012). É um processo muito importante que precisa ser mais conhecido diante de um cenário de mudanças globais (LeBAUER et al., 2013, HUNTINGFORD et al., 2013; ROGERS, 2014; DIETZE, 2014).

Smith; Dukes (2012) fizeram uma análise como os DGVMs tratam três processos de aclimação e regulação nas plantas: (1) a resposta de assimilação fotossintética ao elevado CO<sub>2</sub>; (2) a resposta da fotossíntese em relação ao aquecimento; e (3) a resposta da respiração autotrófica em relação ao aquecimento.

Smith; Dukes (2012) avaliaram 17 modelos e os estudos mostraram que em escala regional, o fluxo de carbono simulado entre a atmosfera e a vegetação pode diferir drasticamente entre versões de modelos que incluem aclimatação ou não.

Os modelos que incluem a aclimatação para alto CO<sub>2</sub> a tratam, geralmente, como uma função da disponibilidade de nitrogênio na folha (algumas vezes incluem um modelo de nitrogênio) (SMITH; DUKES, 2012). No entanto, atualmente, os algoritmos para ESM foram projetados para simular com eficiência apenas processos de pequenas escalas (Figura 3.5). Assim os modelos representam a resposta instantânea (Figura 3.5a) que é o aumento da assimilação de carbono (Figura 3.5b - letra A) que ocorre ao nível da célula e dos órgãos num escala temporal de segundos a minutos. Os processos que ocorrem em grandes escalas e longos períodos de tempo, raramente são representados nos modelos. A retroalimentação biogeoquímica ocorre ao nível da planta, com a limitação de nutrientes (N, P) numa escala temporal de anos a décadas. Assim, ocorre um declínio na produção fotossintética diante da limitação desses nutrientes. E por fim, a adaptação das plantas a uma condição ambiental induzida que ocorre numa escala temporal de décadas a séculos (SMITH; DUKES, 2012).

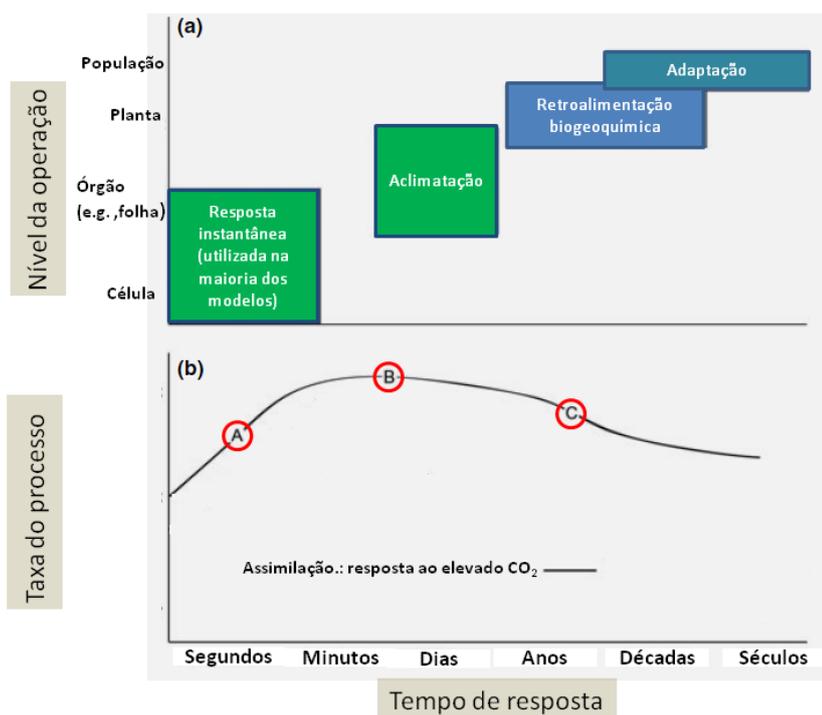


Figura 3.5 (a) Gráfico conceitual das respostas das plantas (em diversos níveis: célula, órgão, planta e população) ao alto CO<sub>2</sub> atmosférico e escala temporal em que ocorre o processo (b) gráfico conceitual mostra a resposta de fotossíntese das plantas em relação ao aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera, mostrando as respostas como: A – aumento de taxas de fotossíntese; B – redução estomática; e C – limitação de nutrientes (N, P) para a fotossíntese diante da alta demanda de CO<sub>2</sub> – numa escala temporal.

Fonte: Adaptada de Smith; Dukes (2012)

A Figura 3.6 mostra um resumo da evolução dos principais modelos em relação a TFPs, FvCB, dinâmica, aclimação, combinação de características de plantas que é complementado na Tabela 3.1, acrescentando informações sobre o  $V_{c_{max}}$  se é estimado com a disponibilidade de nitrogênio

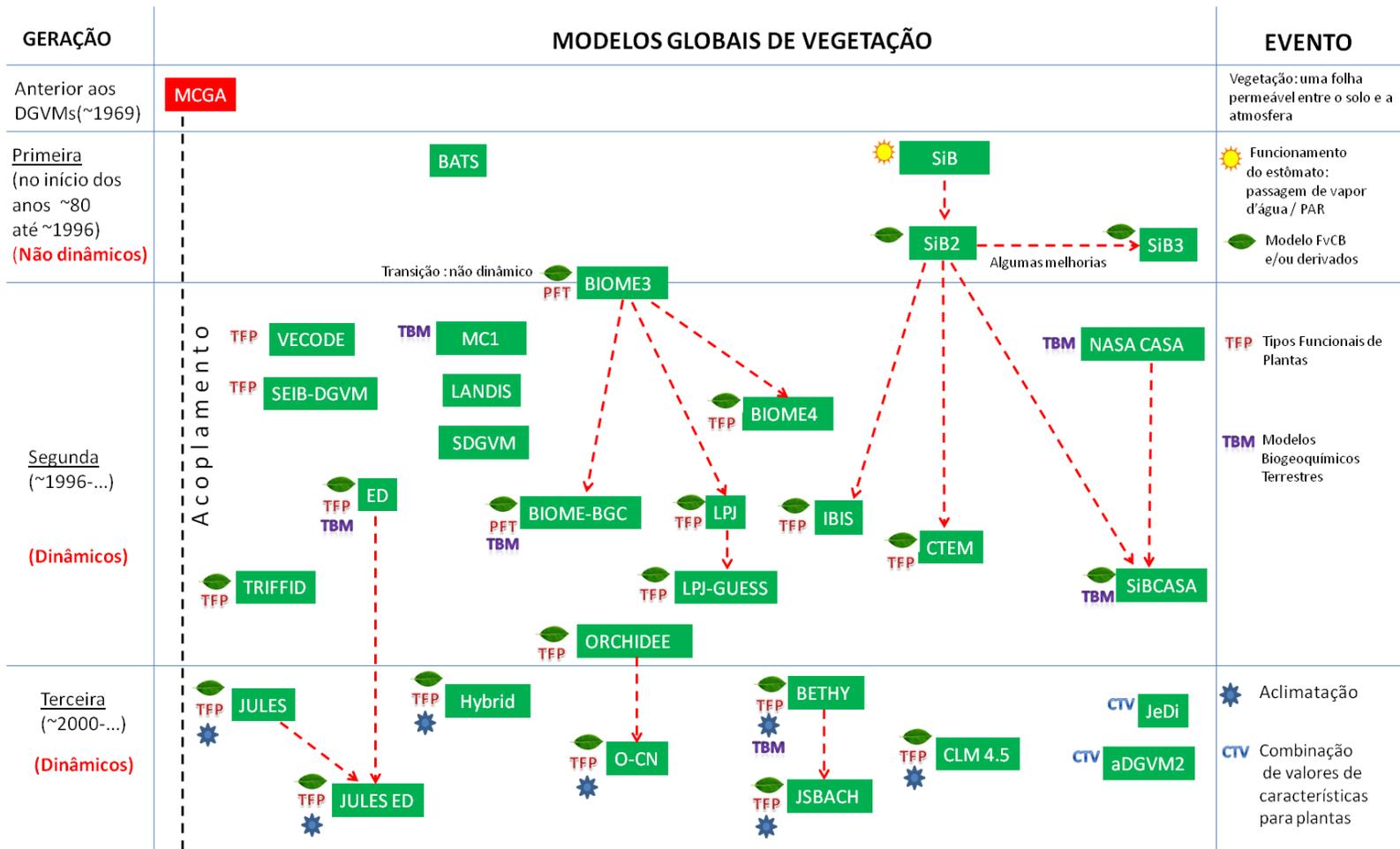


Figura 3.6 Evolução dos DGVMs em relação à fisiologia de plantas

Tabela 3.1 – DGVMs e principais processos fisiológicos

Modelo (* dinâmico)	Fotossíntese	Condutância estomática	$V_{c_{max}}$ relacionado ao conteúdo de nitrogênio na folha	TFPs	Aclimação	Observação
aDGVM (adaptive Dynamic Global Vegetation Model) (SCHEITTER; HIGGINS, 2009) (*)	FvCB Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992)	Ball et al. (1987) Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992)	Não	Variáveis modeladas	Não	
BATS (Biosphere-atmosphere Transfer Scheme) (DICKINSON et al., 1984)	No	Jarvis (1976)	Não	-		
BETHY (Biosphere Energy Transfer Hydrology Scheme) (KNORR, 2000; ZIEHN et al., 2011) (*)	FvCB and Bayesian approach	Ball et al. (1987)	Sim	12	Aclimação de fotossíntese à temperatura	Sub grade de células com diferentes TFPs
BIOME3 (HAXELTINE; PRENTICE, 1996b)	FvCB Haxeltine; Prentice (1996a)	Jarvis; McNaughton, (1986)	Não	13	Não	
BIOME4 (KAPLAN et al., 2003) (*)	FvCB Haxeltine; Prentice (1996a)	Haxeltine; Prentice (1996a)	Não	13	Não	
BIOME-BGC 4.2 (RUNNING et al., 2010) (*)	FvCB	Körner. (1995).	Sim	3	Não	
CLM 4.5 (Community Land Model) (OLESON et al., 2013) (*)	FvCB Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992)	Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992) Sellers et al. (1996b)	Sim	17	Não	
CTEM (Canadian Terrestrial Ecosystem Model) (ARORA, 2003, ARORA; BOER, 2010) (*)	FvCB Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992)	Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992)	$V_{c_{max}}$ ajustado para reproduzir padrões espaciais globais observados de PPB.	6	Não	
ED (Ecosystem Demography) (MEDVIGY et al., 2009) (*)	FvCB	Leuning (1995)	Não. $V_{c_{max}}$ tem valores constantes para TFP.	5	Não	
IBIS (Integrator Biosphere Simulator) (FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000) (*)	FvCB	Collatz et al. (1991); Collatz et al. (1992); Leuning (1995)	Não. Valor de $V_{c_{max}}$ varia apenas com a umidade do solo.	12	Não	

Modelo (* dinâmico)	Fotossíntese	Condutância estomática	V <sub>c</sub> <sub>max</sub> relacionado ao conteúdo de nitrogênio na folha	TFPs	Aclimação	Observação
JeDi (Jena Diversity-Dynamic Global Vegetation Model (PAVLICK et al., 2013) (*)	Não	Não	Sim	-	Não	Combinações com características de plantas que permitem múltiplas possibilidades para caracterizar comunidades de plantas, crescimento e competição entre as plantas.
JSBACH (Joint Scheme for Biosphere Atmosphere Coupling in Hamburg) (*)	FvCB	Collatz et al. (1992)	Sim	13	Sim. Fotossíntese / temperatura	
JULES (The Joint UK Land Environment Simulator (MERCADO et al., 2007; BEST et al., 2011; CLARK et al., 2011) (*)	FvCB	Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992) Jacobs (1994)	Sim	5	Diminuição de nitrogênio	Quatro tipos que não são de vegetação: urbano, água, solo descoberto e gelo.
JULES ED (FISHER et al., 2010) (*)	FvCB	Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992) Jacobs (1994)	Sim	7	Diminuição de nitrogênio	
LANDIS (Spatially Explicit Model of Forest Landscape Disturbance, Management, and Succession) (HE et al., 2012) (*)	Não	Não	-	-	Não	Simula a dinâmica de sucessão de floresta, dispersão de sementes, vento, fogo, distúrbios biológicos (insetos e doenças), colheita e decomposição
LPJ (Lund-Potsdam-Jena DGVM) (SITCH et al., 2003) (*)	FvCB Collatz et al. (1992)	Haxeltine; Prentice (1996a)	Sim	10	Não	
LPJ-GUESS (SMITH et al., 2001; SITCH et al., 2003; GERTEN et al., 2004; HICKLER et al., 2012) (*)	FvCB Collatz et al. (1992)	Haxeltine; Prentice (1996a)	Sim		Não	

Modelo (* dinâmico)	Fotossíntese	Condutância estomática	$V_{c_{max}}$ relacionado ao conteúdo de nitrogênio na folha	TFPs	Aclimação	Observação
MC1 (Mapping Century) (BACHELET et al., 2001) (*)	Não	Neilson (1995)	Não	-	Não	Criado para avaliar o impacto de mudanças climáticas globais na estrutura dos ecossistemas.
NASA-CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) (POTTER; KLOOSTER, 1999) (*)	Não	Não	Não	10	Respostas bioquímicas ao clima para longos intervalos (de décadas a séculos).	Competição das plantas por recursos (água e luz). Ciclo do nitrogênio.
O-CN (ZAEHLE; FRIEND, 2010) (*)	FvCB Collatz et al. (1992)	Ball et al. (1987)	Conteúdo de N na folha para cada camada de dossel – estimativa de $V_{c_{max}}$ para cada camada		Aclimação controlada pelo investimento de N nos tecidos das plantas	Extensão do ORCHIDEE - inclui processos de EUN.
ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems) (KRINNER et al., 2005) (*)	FvCB Collatz et al. (1992)	Ball et al. (1987)	Uma fotossíntese ótima com a temperatura, idade da folha e posição no dossel. A capacidade fotossintética também está condicionada ao conteúdo de N na folha.	12	Não	
SDGVM –(Sheffield-DGVM) (WOODWARD et al., 1995; WOODWARD; LOMAS, 2004) (*)	A produtividade está condicionada ao sequestro de nitrogênio.	Não	Não	-	Não	Ciclo do nitrogênio.
SEIB-DGVM (SATO et al., 2007) (*)	Produção fotossintética é estimada por uma função da intensidade de PAR	Ball et al. (1987) Leuning (1995)	Não	10	Não	O modelo foi projetado para o trabalho de biólogos em campo na realização de medidas e comparação quando os dados são relativamente simples.
SiB (Simple Biosphere Model) (SELLERS et al., 1986)	Não	Não	Não	-	Não	

Modelo (* dinâmico)	Fotossíntese	Condutância estomática	$V_{c_{max}}$ relacionado ao conteúdo de nitrogênio na folha	TFPs	Acclimação	Observação
SiB2 (SELLERS et al. 1996b; DENNING et al., 1996; RANDALL et al., 1996)	FvCB	Collatz et al.(1991) Collatz et al. (1992) Sellers et al.,(1996a); Randall et al.(1996)	Não. Valor de $V_{c_{max}}$ varia apenas com a umidade do solo.	-	Não	Fonte: SiB. Incorporados o modelo FvCB e condutância.
SiB3 (Simple Biosphere Model 3) (BAKER et al., 2008)	FvCB	Collatz et al.(1991) Collatz et al. (1992) Sellers et al.,(1996a); Randall et al.(1996)	Não. Valor de $V_{c_{max}}$ varia apenas com a umidade do solo.	-	Não	Implementação: resposta fotossintética aos níveis elevados de luz.
SiBCASA (SCHAEFER et al., 2008) (*)	FvCB Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992)	Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992) Ball et al. (1987)	Não. Valor de $V_{c_{max}}$ varia apenas com a umidade do solo.	-	Não	
TRIFFID (Top-down Representation of Interactive Foliage and Flora Including Dynamics) (COX, 2001) (*)	Collatz et al. (1991) Collatz et al. (1992)	Cox et al. (1998)	Sim	5	Não	Tipos de não vegetação: solos descobertos, água, áreas urbanas e gelo.
VECODE (VEgetation COntinuous DEscription) (BROVKIN et al., 1997) (*)	Não	Não	Não	3 (árvores, arbustos, gramíneas)	Não	

### 3.3. O modelo INLAND

O INLAND (*Integrated Model of Land Surface Process*) (INPE, 2013; TOURIGNY, 2014) utilizado neste trabalho é derivado do IBIS (Integrated Biosphere Simulator) (FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000), é um modelo de simulação da biosfera terrestre e foi projetado para integrar vários processos do ecossistema em uma única estrutura fisicamente consistente. O objetivo principal do INLAND é a representação dos ecossistemas brasileiros e também de outras partes da América do Sul. Entretanto, os Modelos do Sistema Terrestre geralmente tratam de forma inadequada alguns biomas brasileiros como o Cerrado e a Caatinga.

O INLAND está estruturado de forma hierárquica e modular em que cada um dos módulos tem funções específicas (Figura 3.7). A atmosfera contribui como se fosse um módulo externo ao modelo fornecendo os forçantes: radiação solar incidente, radiação de onda longa incidente, temperatura do ar, velocidade horizontal do vento, precipitação e umidade relativa do ar.

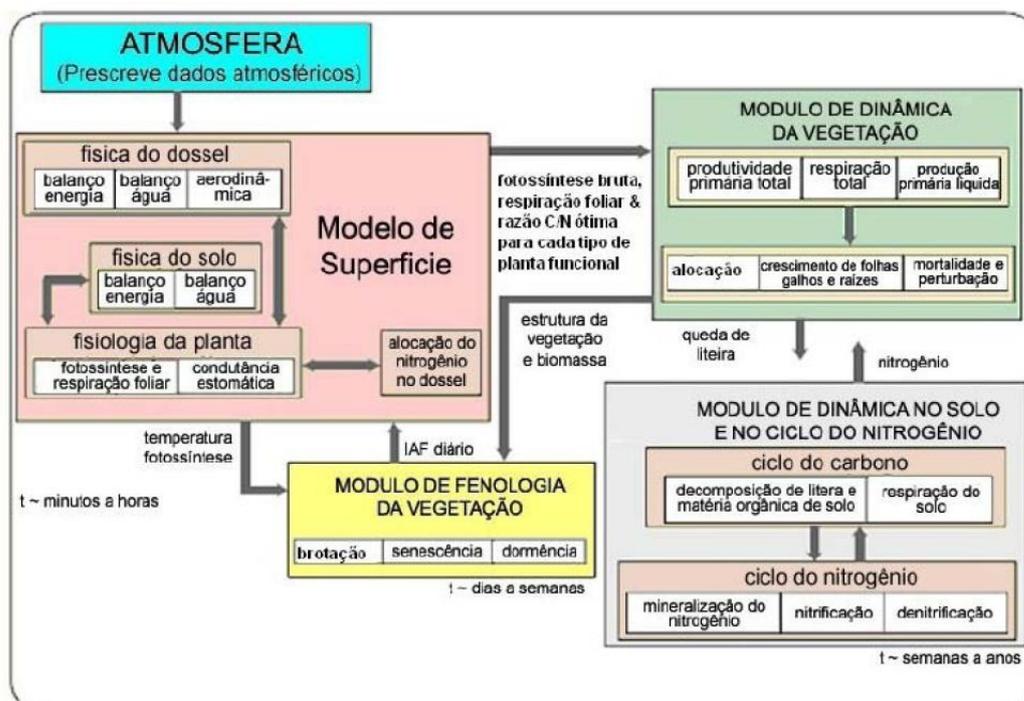


Figura 3.7 – Esquema do Modelo INLAND (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2012)

### 3.3.1. Algumas melhorias do INLAND

Algumas melhorias foram implementadas no módulo INLAND (Figura 3.8) como um módulo de incêndio (TOURIGNY, 2014); incorporação do *Agro-Ecosystem Model Agro-IBIS* (KUCHARIK, 2006) para simular culturas de soja, milho, trigo e cana de açúcar; representação de heterogeneidade em escala de sub-grade (TOURIGNY, 2014).

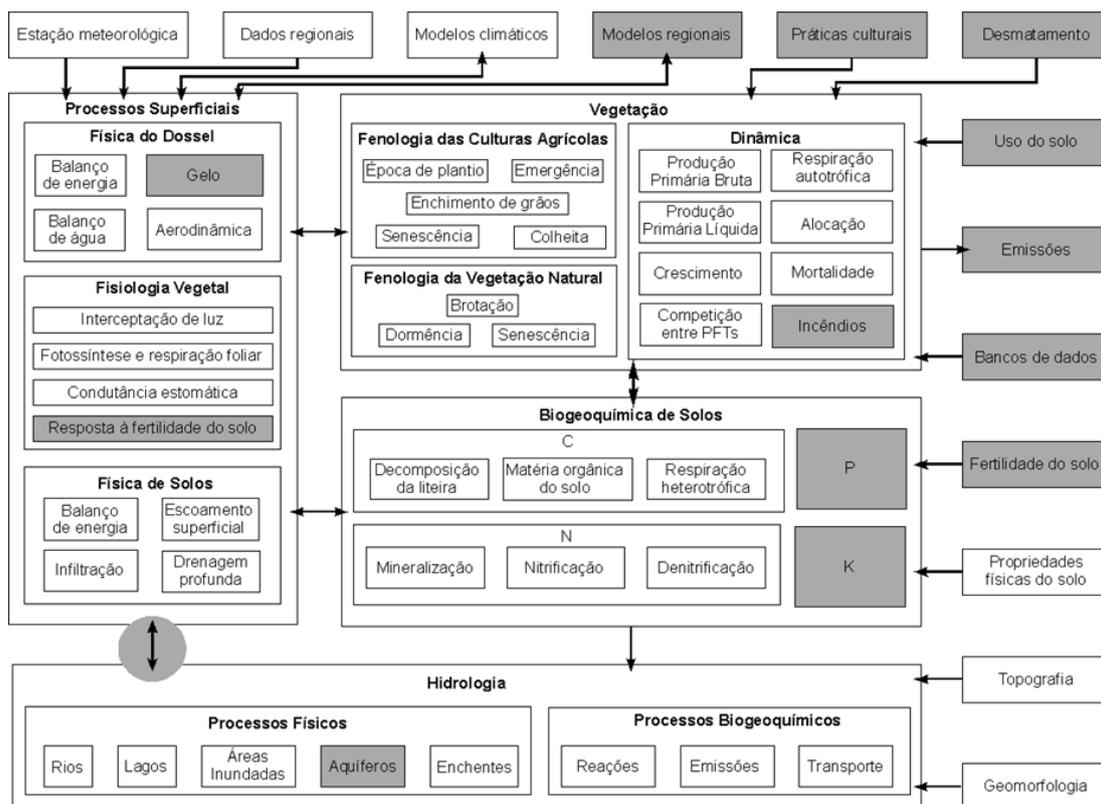


Figura 3.8 Esquema do modelo INLAND e seus componentes (componentes novos/previstos em cinza)

Fonte: Tourigny (2014).

O código da programação foi desenvolvido na linguagem Fortran (*FORMULA TRANSLATION*), e cada módulo é um arquivo de extensão “F90” (formato proprietário do Fortran), algumas variáveis e parâmetros são globais (definidas nos arquivos .h), ou seja podem ser lidos de qualquer módulo; outras são locais e só podem ser lidos no próprio módulo.

O código do programa tem uma simplicidade que facilita a compreensão, além de conter comentários e a composição das variáveis que são sucintas e lógicas contribuindo na identificação dos parâmetros do modelo.

O INLAND pode ser configurado para ser executado no **modo em grade** (*GRID*), tanto em escala global como regional; e **modo pontual** (*SINGLE POINT*), para dados de torres micrometeorológicas. Um dos principais objetivos de executar o modelo no modo pontual é a calibração dos parâmetros meteorológicos, biofísicos e biológicos (DELIRE; FOLEY, 1999).

Outras melhorias do ponto de vista computacional foram realizadas ao migrar do IBIS para o INLAND como compatibilidade com diferentes compiladores (*gfortran*, *ifort* e *pgf90*); baixo consumo de memória RAM; paralelização do código; migração do código para Fortran 90.

### 3.3.2. O módulo de fisiologia vegetal

O módulo de fisiologia vegetal do INLAND segue basicamente o modelo bioquímico de Farquhar et al. (1980), Farquhar; Sharkey (1982) e Collatz et al. (1991). Nesta Seção, algumas das equações básicas deste módulo são apresentadas.

O cálculo da produção bruta de fotossíntese para as plantas (árvores e herbáceas)  $C_3$  é expresso como o mínimo de três limitações na capacidade de fixar carbono (FARQUAR et al., 1980, COLLATZ et al., 1991). A taxa de fotossíntese por unidade de área da folha,  $A_g$  ( $\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) é dada por:

$$A_g \approx \min(A_j, A_c, A_s) \quad (2.1).$$

A taxa de fotossíntese na saturação da luz no INLAND é dada por

$$A_j = \alpha Q \cdot \frac{C_i - \Gamma^*}{C_i + 2\Gamma^*} \quad (2.2).$$

Onde  $Q$  é o fluxo de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) absorvida pela planta ( $\text{fótons m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\alpha$  é o valor da eficiência quântica no sequestro de  $\text{CO}_2$

em plantas  $C_3$  ( $\text{mol.CO}_2.\text{fóton}^{-1}$ ) definido por Farquhar et al. (1980),  $c_i$  é a concentração de  $\text{CO}_2$  em espaços aéreos intercelulares da folha ( $\text{mol mol}^{-1}$ ). À medida que o fluxo de  $\text{CO}_2$  aumenta, a assimilação fotossintética de  $\text{CO}_2$  cresce linearmente até igualar-se à liberação de  $\text{CO}_2$  pela respiração mitocondrial.  $\Gamma^*$  é o ponto de compensação ( $\text{mol mol}^{-1}$ ), e ele ocorre quando há equilíbrio entre absorção fotossintética e liberação de  $\text{CO}_2$  (TAIZ; ZEIGER, 2009) e é dado por

$$\Gamma^* = \frac{[O]}{2\tau} \quad (2.3)$$

Onde  $[O]$  é a concentração atmosférica de  $\text{O}_2$  (0,209) e  $\tau$  é a taxa de parâmetros cinéticos descrevendo a atividade da enzima para a função de carboxilase ou oxigenase.

A taxa de saturação da Rubisco na fotossíntese é dada por:

$$A_c = \frac{Vc_{\max}(C_i - \Gamma^*)}{C_i + K_c \left(1 + \frac{[O]}{K_o}\right)} \quad (2.4).$$

Onde  $Vc_{\max}$  é a capacidade máxima da Rubisco ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) para desempenhar sua função de carboxilase e  $K_c$  e  $K_o$  são os coeficientes Michaelis-Menten ( $\text{mol mol}^{-1}$ ) para  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , respectivamente.

Mesmo que haja um aumento de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, as plantas têm limitações em suas capacidades de assimilar o  $\text{CO}_2$  disponível. Essas limitações podem ocorrer devido à enzima Rubisco catalisar continuamente e as moléculas RuBP (aceptoras de carbono) não se regenerarem a contento; pode ser porque não há fosfato inorgânico ( $\text{P}_i$ ) suficiente nos cloroplastos para a síntese de ATP (STIT, 1991; SAGE; KUBIEN, 2007; TAIZ; ZEIGER, 2009). Essa limitação é dada por:

$$A_s = 3T \left(1 - \frac{\Gamma}{C_i}\right) + \frac{J_P \Gamma}{C_i} \quad (2.5).$$

Onde  $T$  é a taxa de utilização de triose fosfato.  $T$  e  $V_{c_{\max}}$  estão correlacionados e Amthor (1994) cita que através de resultados publicados por Wullschleger (1993), a realização de uma análise sobre 116 espécies  $C_3$ , mostra que o valor médio para uma taxa de  $V_{c_{\max}}$  para  $T$  foi de 8,2, como expressa a equação:

$$T = \frac{V_{c_{\max}}}{8,2} \quad (2.6)$$

O termo  $J_p$  que Collatz et al. (1991) denominam de **variável intermediária** é definido pela equação (2.7). Ainda Collatz et al. (1991), observaram que a transição entre as três potenciais taxas de produção fotossintética ( $A_c$ ,  $A_j$ ,  $A_s$ ) não é acentuada, mas bastante gradual. Assim com a finalidade contornar essa limitação, propõem duas equações quadráticas associadas entre si (2.7 e 2.8).

$$\theta J_p^2 - J_p(A_j + A_c) + A_e A_c = 0 \quad (2.7)$$

$$\beta A_g^2 - A_g(J_p + A_s) + J_p A_s = 0 \quad (2.8)$$

Onde  $\theta$  e  $\beta$  são constantes empíricas (COLLATZ et al., 1991; FOLEY et al., 1996).

A produtividade primária bruta (PPB) – é calculada por hora para cada tipo funcional de planta  $i$  como

$$PPB = \int A_{g,i} dt \quad (2.9)$$

onde  $A_g$  é a produção bruta de fotossíntese, e a integração é feita para o ano todo. A produtividade primária líquida (PPL) anual para cada tipo funcional de planta  $i$  é dada pela soma horária dos termos dos fluxos de carbono e da respiração conforme a equação:

$$PPL = (1 - \eta) \int (A_{g,i} - R_{folha,i} - R_{tronco,i} - R_{raiz,i}) dt \quad (2.10)$$

Onde  $R_{folha,i}$  é a respiração da folha,  $R_{tronco,i}$  é a respiração do tronco e  $R_{raiz,i}$  é a respiração da raiz e  $\eta$  (0,33) é a fração de carbono perdida na construção da estrutura da planta devido à respiração durante o crescimento (FOLEY et al., 1996).

### 3.3.3. Condutância estomática no INLAND

Desde que se iniciou a considerar nos modelos a interação da vegetação com a atmosfera, a condutância estomática tem sido uma parte complexa e importante devido a sua habilidade de controlar a evapotranspiração e liberar vapor de água para o ambiente em grandes ou pequenas quantidades. Segundo Berry et al. (2010) o estômato tem uma função chave no sistema terrestre pelo menos nos últimos 400 milhões de anos, contribuindo nos processos não lineares que aceleraram os ciclos hidrológicos nos continentes e favoreceram zonas climáticas para a vida das plantas. Berry et al. (2010) enfatizam que muitas vezes se pensa que o controle das respostas da vegetação no mundo real estão limitadas a padrões sazonais de crescimento, mudança da disponibilidade da água no solo, ou mudanças na intensidade da luz e potencial hídrico na folha durante o dia. No entanto, o impacto desses controles na troca de energia e vapor d'água com a atmosfera são também intermediados pelo estômato.

O cálculo de condutância estomática no INLAND é o que foi proposto por Ball; Berry (1982) com uma equação que descreve a resposta de  $g_s$  a taxa de sequestro de  $CO_2$  ( $A_n$ ) e à umidade relativa ( $h_s$ ) e a fração de mol de  $CO_2$  ( $c_s$ ) do ar na superfície da folha (COLLATZ et al., 1991):

$$g_s = m \frac{A_n h_s}{c_s} + b \quad (2.11)$$

Onde os termos **m** e **b** são respectivamente os coeficientes de inclinação e o intercepto obtidos pela análise da regressão linear de dados de troca de gás de folhas em ambiente com ventilação e temperatura controlada (BALL et al., 1987). Esses coeficientes (**m** e **b**) são parametrizados no INLAND, no módulo **canopy**.

### 3.3.4. Tipos funcionais de plantas (TFPs) no INLAND

No INLAND são definidos 12 TFPs (Tabela 3.2) que representam os tipos de plantas mais importantes do mundo.

Tabela 3.2 - Tipos Funcionais de Plantas definidos no INLAND

TFP	Descrição
1	Tropical broadleaf evergreen trees
2	Tropical broadleaf drought-deciduous trees
3	Warm-temperate broadleaf evergreen trees
4	Temperate conifer evergreen trees
5	Temperate broadleaf cold-deciduous trees
6	Boreal conifer evergreen trees
7	Boreal broadleaf cold-deciduous trees
8	Boreal conifer cold-deciduous trees
9	Evergreen shrubs
10	Deciduous shrubs
11	C <sub>4</sub> grasses
12	C <sub>3</sub> grasses

Ainda no INLAND, uma parametrização é feita para cada TFP em relação a parâmetros fisiológicos como  $V_{c_{max}}$ , área foliar específica (*specla*) ( $m^2 kg^{-1}$ ), área foliar, turnover (fim de ciclo e início de outro de produtividade) de biomassa foliar (*tauleaf*) (anos); *turnover* de biomassa das raízes (*tauroot*) (anos), *turnover* de biomassa do tronco (*tauwood*) (anos), coeficiente de alocação de biomassa foliar (*aleaf*), coeficiente de alocação de biomassa das raízes (*aroot*), coeficiente de alocação de biomassa do tronco (*awood*) (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – TFPs e parâmetros ecofisiológicos na forma padrão do INLAND

TFP	$V_{c_{max}}$	specla	tauleaf	tauroot	tauwood	aleaf	aroot	awood
1	80,0e-06	25,0	1,01	1,0	25,0	0,30	0,20	0,50
2	65,0e-06	25,0	1,00	1,0	25,0	0,30	0,20	0,50
3	40,0e-06	25,0	1,00	1,0	25,0	0,30	0,20	0,50
4	30,0e-06	12,5	2,00	1,0	50,0	0,30	0,40	0,30
5	30,0e-06	25,0	1,00	1,0	50,0	0,30	0,20	0,50
6	25,0e-06	12,5	2,50	1,0	100,0	0,30	0,40	0,30
7	30,0e-06	25,0	1,00	1,0	100,0	0,30	0,20	0,50
8	30,0e-06	25,0	1,00	1,0	100,0	0,30	0,20	0,50
9	27,5e-06	12,5	1,50	1,0	5,0	0,45	0,40	0,15
10	27,5e-06	25,0	1,00	1,0	5,0	0,45	0,35	0,20
11	15,0e-06	20,0	1,25	1,0	999,0	0,45	0,55	0,00
12	25,0e-06	20,0	1,50	1,0	999,0	0,45	0,55	0,00

$V_{c_{max}}$  parametrizada em 15<sup>0</sup>C no topo do dossel ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), área foliar específica (specla) ( $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ), fim de ciclo e início de outro ciclo de produtividade (*turnover*): biomassa foliar (tauleaf) (anos); biomassa das raízes (tauroot) (anos), biomassa do tronco (tauwood) (anos), coeficiente de alocação de biomassa foliar (aleaf), coeficiente de alocação de biomassa das raízes (aroot), coeficiente de alocação de biomassa do tronco (awood)

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Experimento com alto CO<sub>2</sub> (LAFIECO-USP)**

Foi realizado um experimento no Laboratório de Fisiologia Ecológica de Plantas (LAFIECO) no Departamento de Botânica, Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo com o objetivo de analisar as respostas ecofisiológicas da *P. microphylla*, espécie nativa da Caatinga, em relação a uma atmosfera com alta concentração de CO<sub>2</sub>.

#### **4.1.1. Cultivo das plantas**

As sementes foram lavadas em hipoclorito de sódio por 10 minutos, e em seguida lavadas em água corrente. A germinação ocorreu em bandejas plásticas contendo vermiculita. As mesmas foram colocadas em câmaras de germinação do tipo BOD, onde foram mantidas a 29°C com fotoperíodo 12/12 sendo regadas a cada dois dias.

#### **4.1.2. Desenho experimental**

A germinação das sementes ocorreu após sete dias (emissão da radícula). As plântulas foram então transferidas para vasos de 10 L contendo terra vegetal. Os vasos foram distribuídos em quatro OTCs. Cada uma das câmaras (OTCs) (Figura 4.1) possui 1,50 m de diâmetro e 3,00 m. de altura; e estão providas de um sistema de circulação de ar e acopladas a um cilindro que manteve no interior de duas delas, a concentração de CO<sub>2</sub> em torno de 400 µmol mol<sup>-1</sup> (atmosfera ambiente), e as outras duas OTCs estiveram acopladas a outro cilindro que manteve a concentração de CO<sub>2</sub> em torno de 800 µmol mol<sup>-1</sup>. A concentração do gás no interior das câmaras foi monitorada através de um medidor portátil de CO<sub>2</sub> (Testo®, modelo 435).

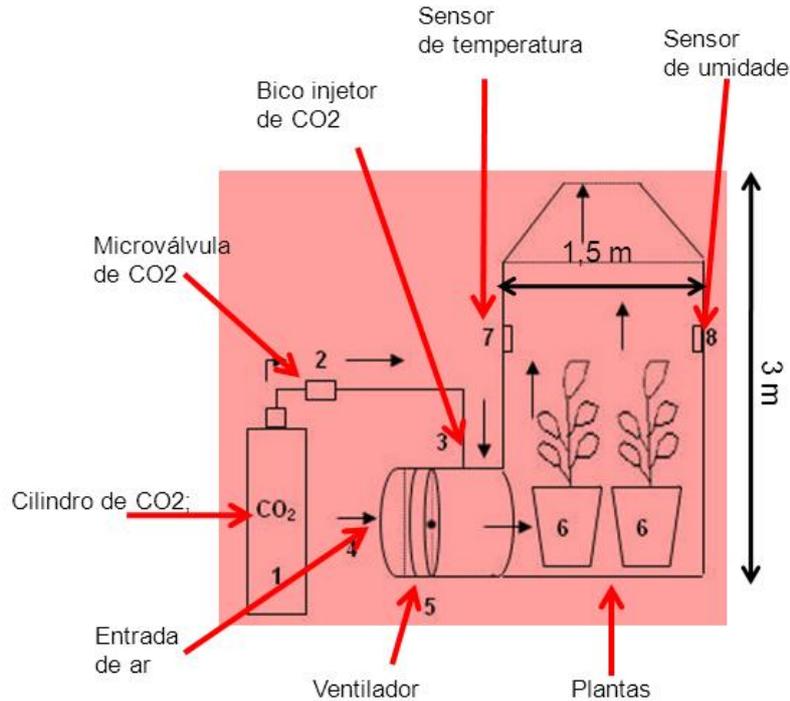


Figura 4.1 Esquema de uma câmara de topo aberto

Fonte: adaptado de Arenque (2010)

Uma câmara de cada tratamento ( $\text{CO}_2$  ambiente e  $\text{CO}_2$  elevado) foi mantida em regime de estresse hídrico por suspensão de rega enquanto a outra câmara foi regada a cada dois dias (até saturação do substrato), totalizando quatro tratamentos distintos:  $\text{CO}_2$  ambiente/seco,  $\text{CO}_2$  elevado/seco,  $\text{CO}_2$  ambiente e  $\text{CO}_2$  elevado (Tabela 4.1 e Figura 4.2). Todos os tratamentos foram regados com solução nutritiva (Hoagland modificado) uma vez por semana (100 mL por planta).

Tabela 4.1 Tratamentos nas OTCS

Câmara	$\text{CO}_2$	Regime de água
1	ambiente	seco
2	elevado	seco
3	ambiente	regas (2 dias)
4	elevado	regas (2 dias)

Ao longo do desenvolvimento das plântulas foram realizadas 3 coletas: antes de iniciar os tratamentos de seca e alto CO<sub>2</sub> que foi definido como tempo zero (T<sub>0</sub>) e mais duas datas (tempo um – T<sub>1</sub> e tempo dois – T<sub>2</sub>) que foram determinadas de acordo com a umidade do solo nos vasos contendo as plantas em regime de estresse hídrico (Figura 4.2). De acordo com esse critério, T<sub>1</sub> ocorreu (38 dias após início dos tratamentos) quando o solo atingiu 50% de umidade, e T<sub>2</sub> (79 dias após o início dos tratamentos) quando a umidade se aproximou de 0%. A umidade foi mensurada com o auxílio de sensores de umidade (modelo EC-5, Decagon Devices) inseridos na terra ao longo dos tubos (perfil vertical), garantindo que a umidade estava baixa inclusive nas porções mais baixas do vaso. Foram utilizados 16 sensores, sendo quatro para cada tratamento. Até o vigésimo nono dia do experimento, os sensores de umidade do solo estavam no topo dos vasos. Ocorrendo a desidratação quase completa para as condições de seco, os sensores foram movidos para a base dos vasos (a partir do trigésimo dia).

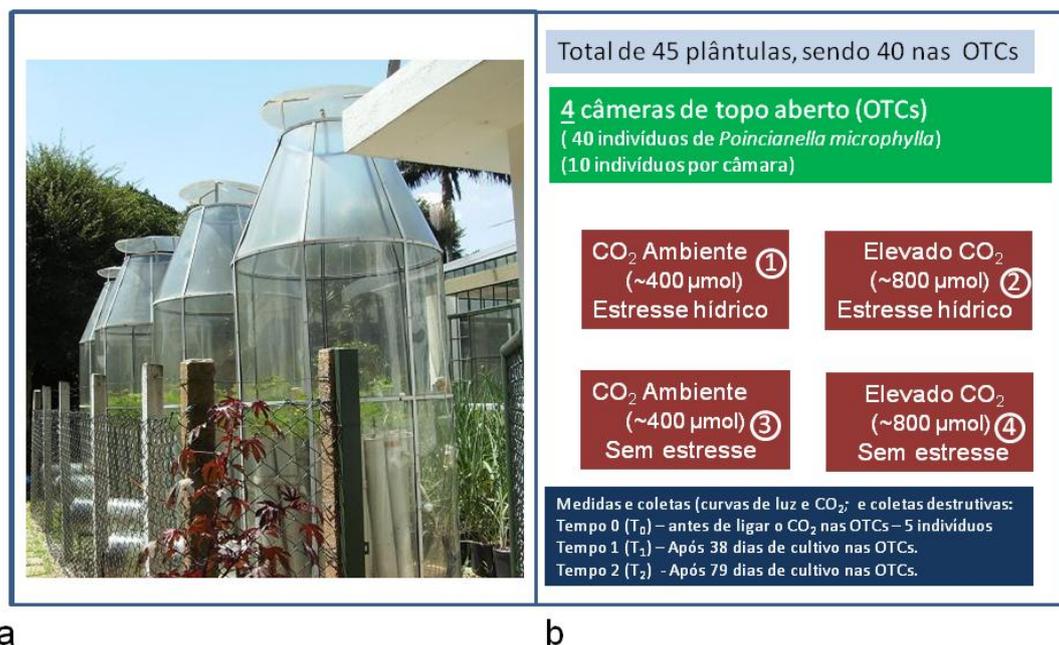


Figura 4.2 Câmaras de topo aberto e experimento LAFIECO (a) 4 câmaras de topo aberto (OTC) em experimento com a catingueira falsa; b) Esquema do experimento descrevendo as condições de concentração de CO<sub>2</sub> e estresse hídrico para cada uma das câmaras em que as plantas foram cultivadas

As coletas T0, T1 e T2 foram realizadas respectivamente nos dias: 24 de janeiro de 2013, 5-7 março de 2013, e 16-19 de abril de 2013. Na ocasião de cada coleta foram realizadas medidas não destrutivas: altura, número de folhas, área foliar e trocas gasosas (assimilação pontual com IRGA Li Cor 6400).

Após estas medidas os indivíduos foram retirados do tubo por inversão, os órgãos foram separados e a raiz lavada em água corrente. A seguir cada órgão foi pesado separadamente para determinação da massa fresca e posteriormente colocada em nitrogênio líquido para congelamento e secagem em liofilizador. A análise de carboidratos foi feita pelo grupo do LAFIECO com o objetivo de obter correlações entre a folha utilizada para medir a fotossíntese e a quantificação dos açúcares produzidos pela mesma.

As trocas gasosas foram realizadas pelo sistema de fotossíntese portátil (modelo LI 6400 XTR, Li-Cor, Nebraska, EUA) e as medidas foram realizadas na primeira folha totalmente expandida e em cada tratamento foram utilizados 5 indivíduos, por coleta. Foram realizadas medidas pontuais com os seguintes parâmetros: 28°C como temperatura foliar, fluxo de 400  $\mu\text{mol}$  de fótons  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Também foram realizadas as medidas de curvas de luz e de  $\text{CO}_2$  para 5 indivíduos de catingueira. Nas curvas AxCi adotou-se PAR de 800  $\mu\text{mol}$  fótons  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (valor de saturação encontrado em medidas realizadas na Caatinga, em Petrolina) e as concentrações de  $\text{CO}_2$  foram de 50 a 1200  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ . Os pontos utilizados nas curvas de luz variaram entre 0 e 1500  $\mu\text{mol}$  fótons  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . A concentração de  $\text{CO}_2$  utilizada para as análises de trocas gasosas foi de 400  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  para tratamento ambiente e plantas provenientes do tratamento elevado, foi utilizada a concentração de 800  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ .

#### **4.1.3. Medidas de crescimento e biomassa**

Foram realizadas medidas de crescimento das plântulas em relação à altura, área foliar, número de folhas e biomassa. A altura foi medida a partir do aparecimento da primeira raiz lateral até a base do meristema apical do caule. Toda a parte aérea/folhas das plantas coletadas foi escaneada em escala 1:1

imediatamente após o corte. A área foliar foi calculada utilizando o programa Image Pro Plus 6.3 (MediaCybernetics). Para biomassa foram utilizados cinco indivíduos por tratamento.

Foram calculados alguns parâmetros que contribuem para caracterizar o crescimento em plantas. Dentre esses parâmetros foi calculada a Taxa de Crescimento Relativo (TCR) que indica o incremento de biomassa seca por unidade de massa seca pela unidade de tempo que é dada em  $g\ g^{-1}\ dia^{-1}$ . (POORTER; GARNIER, 2007; GRANDIS, 2010). A taxa de crescimento relativa é definida na equação:

$$TCR = \frac{\ln([B_2]) - \ln([B_1])}{t_2 - t_1} \quad (4.1)$$

Onde  $\ln([B])$  é a média dos valores de biomassa total transformados em  $\ln$  (logaritmo natural) como recomendado por Hunt, 1982 e Hoffmann; Poorter, 2002, T o tempo em dias de experimento, onde T1 é o tempo inicial e T2 é o tempo final do experimento.

A taxa de crescimento relativa pode ser decomposta na Taxa de Assimilação Líquida (TAL) ( $g\ m^{-2}\ dia^{-1}$ ). TAL representa a taxa de acúmulo de massa seca por unidade de área foliar ao longo do tempo (POORTER, 2002).

$$TAL = \frac{(B_2 - B_1) \ln(AF_2) - \ln(AF_1)}{t_2 - t_1 \quad AF_2 - AF_1} \quad (4.2)$$

sendo, B a biomassa total das plantas e AF a área foliar. Os subscritos 1 e 2 referem-se às duas coletas consecutivas (HUNT 1982; GRANDIS, 2010).

E para fins de alocação de biomassa, são utilizados conceitos de frações de massa, onde a fração de determinado órgão da planta (raiz, caule e folha) foi calculada dividindo-se a massa seca do respectivo órgão pela massa seca total da planta ( $g\ g^{-1}$ ):

$$F_o = \frac{m_{FCR}}{B} \quad (4.3)$$

onde FO representa a fração do órgão, sendo utilizado FF para a fração folhas, FC para a fração caule e FR para a fração raiz; m a massa seca dos respectivos órgãos indicado pelo subscrito (F = folhas, C= caule e R= raiz) e B a massa seca total da planta.

#### **4.1.4. Análise estatística**

Foi utilizado o método ANOVA *one way* implementado no aplicativo Matlab v.7.12 (HOGG; LEDOLTER, 1987) na análise de variância e para teste da hipótese nula, tendo como  $p < 0,05$ , a premissa para rejeitar a hipótese de nulidade (GOTELLI; ELISSON, 2011).

#### **4.2. Trabalho de campo - sítio experimental**

O trabalho de campo foi realizado numa área de 600 ha de floresta preservada que se recuperou de degradação ocorrida há 40 anos na Caatinga, localizada na sede da Embrapa - Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido – CPATSA, em Petrolina, Pernambuco. A vegetação da Caatinga na região de Petrolina é classificada como Savana Estépica Arbóreo-Arbustiva. Este tipo de vegetação representa 75,72% da área total do bioma Caatinga (PROBIO, 2007). As demais classificações são Savana Estépica Florestada com 20,2%, Savana Estépica Parque com 4,02% e Savana Estépica Gramíneo-Lenhosa com 0,06%. Neste sítio, através do Projeto Caatinga Flux, está instalada uma torre para aquisição de dados micrometeorológicos. A torre fica localizada nas coordenadas geográficas: 9° 2' 47,4144" S; 40° 19' 16,7154" O – e a altitude local é de 394,1 m.

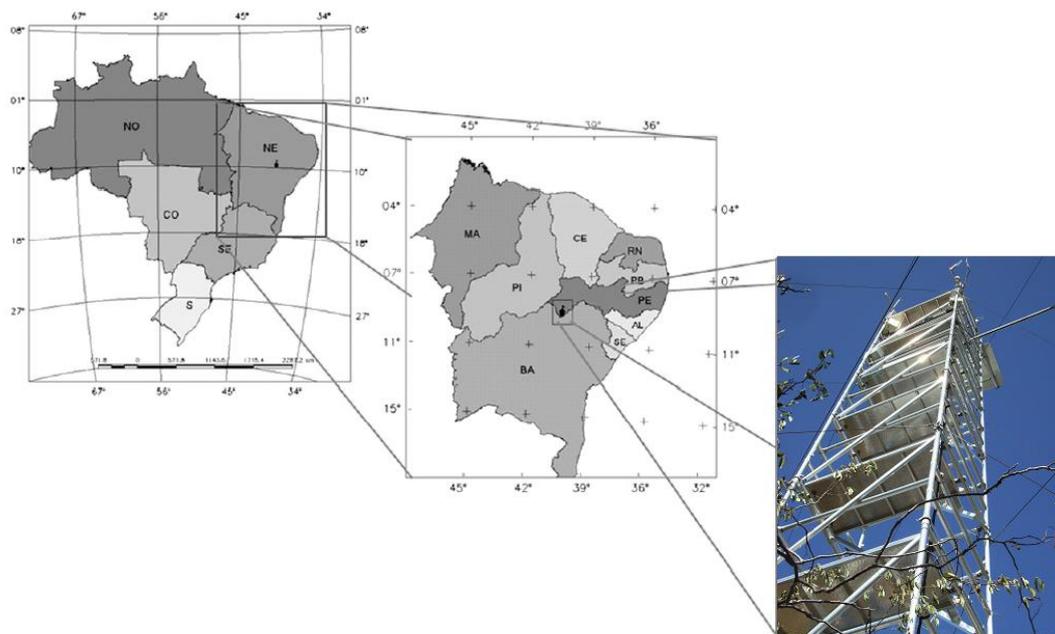


Figura 4.3 Localização geográfica do experimento de campo e torre micrometeorológica instalada na CPATSA em Petrolina, PE.

Fonte: adaptado de Cunha et al. (2013)

#### 4.2.1. Climatologia e solo

A Caatinga é caracterizada por baixa precipitação anual e períodos de seca prolongados (6-8 meses por ano). A estação chuvosa em Petrolina é de dezembro a abril, e a estação seca ocorre de maio a outubro. Numa série de dados do CPTEC-INPE cobrindo 14 anos (1997-2011) (Figura 4.4), observa-se que as temperaturas máximas médias mensais atingem seu valor mais alto em novembro ( $\sim 34^{\circ}\text{C}$ ) e as temperaturas mínimas médias mensais atingem seus valores mais baixos em julho ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ). A precipitação média mensal para este período mostra que fevereiro é o mês de maior precipitação ( $\sim 88$  mm); e agosto é o mês de menor precipitação ( $\sim 1$  mm).

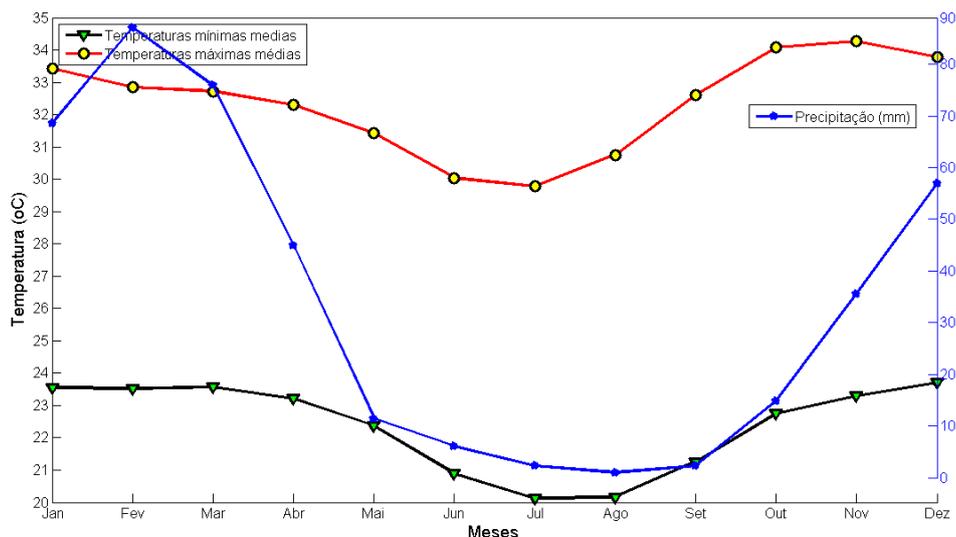


Figura 4.4 - Climatologia de PETROLINA( Lat: -9,38 S Long: -40,49 S ) (1997-2011).

Fonte: CPTEC-INPE (2011)

O solo dessa área experimental é classificado como Podzólico Amarelo (PA) (Embrapa Solos, 2001) que são solos com alto grau de intemperismo, com textura de média a muito argilosa e com baixa disponibilidade de nutrientes (ARAUJO FILHO, 2011).

#### 4.2.2. Dados meteorológicos usados como forçantes do INLAND

Foram coletados neste sítio dados de radiação solar incidente; radiação de onda longa incidente; temperatura do ar; velocidade horizontal do vento; precipitação e umidade relativa do ar. Para medidas de velocidade e direção do vento foi utilizado o anemômetro sônico CS8000 (R. M. Young, Traverse City, Michigan, EUA); para medir a temperatura e a umidade do ar foi utilizado o termohigrômetro HMP45C (Vaisala, Helsinki, Finlândia); a quantidade de precipitação foi medida pelo pluviômetro TB4 (Hydrological Services, Edmonton, Canadá); a medição da radiação de onda curta foi realizada através do piranômetro CM6B (Kipp e Zonen, Delft, Holanda) e medidas de radiação de onda longa incidente foram obtidas com um pirgeômetro (CG1, de Kipp e Zonen). Os dados utilizados nesse trabalho se referem ao ano de 2011 e estão numa resolução de um dado por hora. Devido a problemas técnicos neste sítio,

essa série de dados tem uma lacuna de 9 dias que são os dias do ano: 53, e de 157 a 164.

#### 4.2.3. Área de alcance da torre e predominância dos ventos

Antes de demarcar a espécie e indivíduos em campo, foi realizada uma análise de *footprint* (extensão de alcance dos sensores instalados na torre) e uma estimativa da direção predominante dos ventos. Utilizando o modelo de Hsieh et al. (2000) estimou-se que em condições estáveis, à noite, o alcance do *footprint* é em torno de 150 m (Figura 4.5a). Em condições instáveis, esse alcance é mais próximo da torre (~50 m.). E como mostra o histograma, a direção predominante dos ventos (maior contribuição) é no sentido sudeste ( $125^{\circ}$ ) (Figura 4.5b).

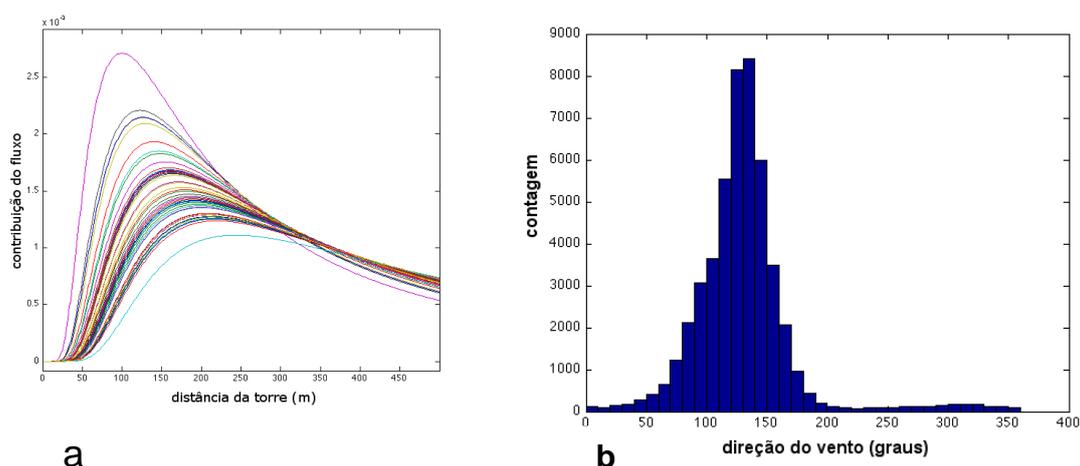


Figura 4.5 a. Alcance dos sensores instalados na torre (*footprint*): em condições estáveis (~150 m) e em condições instáveis (~50m); b. Direção predominante dos ventos ( $125^{\circ}$ )

#### 4.2.4. Dados utilizados para calcular calor latente, calor sensível e PPB

Medidas de alta frequência das componentes do vento, temperatura do ar, concentrações de vapor de água foram realizadas com o sistema de covariância dos vórtices turbulentos (*eddy correlation*), compostos pelo analisador de  $H_2O$  e  $CO_2$  de caminho aberto LI7500 (Licor, Lincoln, Nebraska, EUA) e o anemômetro sônico tridimensional CSAT3 (Campbell). Os dados de alta frequência (16 Hz) foram lidos a cada 0,0625 segundos por um coletor de

dados CR10X (Campbell) e armazenados em um computador portátil. Os dados de fluxos turbulentos se referem ao ano de 2011.

A Produtividade Primária Bruta (PPB) foi estimada através de ferramenta para preenchimento de lacunas e o fluxo de vórtices turbulentos que é fornecido pelo Instituto Max Planck de Biogeoquímica (REICHSTEIN et al., 2005). A Produtividade Primária Líquida (PPL) também é fornecida pelo mesmo instituto citado anteriormente, e é definida como o fluxo líquido de carbono da atmosfera para as plantas (COSTA et al., 2009b), que é dada pela equação

$$PPL = PPB - R_A \quad (4.4)$$

Onde  $R_A$  é a respiração autotrófica.

A PPL está relacionada à Troca Líquida do Ecossistema (TLE) (COSTA et al., 2009b) que pode ser calculada pela equação

$$TLE = PPL - R_H \quad (4.5)$$

Onde  $R_H$  é a respiração heterotrófica.

O método (REICHSTEIN et al., 2005) permite preencher eventuais valores perdidos em uma série temporal. O preenchimento de lacunas do método de covariância turbulenta também considera a covariação dos fluxos com variáveis meteorológicas e da temporal autocorrelação dos fluxos (REICHSTEIN et al., 2005). Neste algoritmo, são identificadas três diferentes condições: 1) quando somente os dados de interesse direto estão faltando, mas todos os dados meteorológicos estão disponíveis; 2) quando a temperatura do ar ou déficit de pressão de vapor está ausente, mas a radiação está disponível; 3) Ou ainda quando os dados de radiação estão ausentes (FALGE et al., 2001; REICHSTEIN et al., 2005).

#### 4.2.5. Parâmetros extraídos das curvas de luz e CO<sub>2</sub>

Em ambos os experimentos (laboratório e campo) foram utilizados os mesmos modelos para obter parâmetros das curvas de resposta à luz (AxPAR) e a variação de CO<sub>2</sub> (AxCi).

Nas curvas AxPAR foram estimados os seguintes parâmetros: **A** (taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub>) ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), **g<sub>s</sub>** (condutância estomática) ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e **C<sub>i</sub>** (concentração intercelular de CO<sub>2</sub>) ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol ar}^{-1}$ ) de acordo com Caemmerer; Farquhar (1981). As curvas de luz foram analisadas pelo modelo da hipérbole não retangular (THORNLEY, 1976; LONG, HÄLLGREN, 1993):

$$A = \frac{\Phi Q + A_{MAX} \sqrt{[(\Phi Q + A_{MAX})^2 - 4\Theta \Phi Q \cdot A_{MAX}]}}{2\Theta} - R_d \quad (4.6)$$

sendo **A** a taxa de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), **Φ** é o rendimento quântico aparente (adimensional), **Q** é o fluxo de fótons fotossinteticamente ativos ( $\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), **A<sub>MAX</sub>** é a assimilação bruta máxima ( $\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), **Θ** convexidade (adimensional) e **R<sub>d</sub>** é a taxa de respiração no escuro ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). A convexidade (**Θ**), termo exigido pelo modelo da hipérbole não retangular, foi calculada de acordo com o melhor ajuste dos pontos. O rendimento quântico (**Φ**) adotado é de 0,053 para plantas cultivadas em CO<sub>2</sub> ambiente e de 0,071 para plantas cultivadas em elevado CO<sub>2</sub> que são valores próximos aos valores encontrados por Long; Drake; (1991). O Ponto de Compensação de Luz (**PCL**) foi calculado pela equação:

$$PCL = \frac{R_d}{\Phi} \quad (4.7)$$

Sendo que **R<sub>d</sub>** (respiração no escuro) é o valor mínimo de assimilação encontrado nas medidas de assimilação

$$R_d = \min(A) \cdot -1 \quad (4.8)$$

A assimilação máxima bruta ( $A_{MAX}$ ) é calculada com a soma do valor máximo de assimilação medida com a  $Rd$  (respiração no escuro).

$$A_{MAX} = \max(A) + Rd \quad (4.9)$$

O ponto de saturação ( $Q_{sat}$ ) foi calculado considerando que a assimilação líquida ( $A$ ) é igual a 0,9 da assimilação máxima que foi medida. Na modelagem é encontrado o ponto de luz ( $Q_{sat}$ ) em que a assimilação foi igual a assimilação líquida ( $A$ ). Ou seja, o ponto de luz correspondente a assimilação líquida na curva de luz modelada: este é o ponto de saturação.

Nas curvas de resposta ao  $CO_2$  (curvas  $Ax C_i$ ) foram analisadas a taxa de assimilação líquida em função da concentração intercelular de  $CO_2$  ( $C_i$ ). As concentrações de  $CO_2$  utilizadas nessas curvas foram entre 50 e 1200  $\mu mol.mol^{-1}$ . Os parâmetros fotossintéticos das curvas  $Ax C_i$  foram calculados a partir do modelo bioquímico proposto por Farquhar et al. (1980), e com as modificações posteriores (CAEMMERER; FARQUHAR, 1981; FARQUHAR; CAEMMERER, 1982; CAEMMERER, 2000) onde **A**:

$$A = V_c(1 - (\Gamma^* / C_i)) - Rd \quad (4.10)$$

Onde **V<sub>c</sub>** é a taxa de carboxilação da RuBP via Rubisco,  $\Gamma^*$  é o ponto de compensação de  $CO_2$ ,  $C_i$  concentração de  $CO_2$  intracelular e  $Rd$  é a taxa de respiração mitocondrial na presença de luz.

A taxa fotossintética de carboxilação da Rubisco é determinada pelo mínimo de 3 limitações as quais podem ocorrer pela falta de  $CO_2$  na carboxilação da enzima Rubisco ( $A_c$ ), pelo transporte de elétrons para a regeneração da RuBP ( $A_j$ ) e na utilização de trioses fosfato ( $A_s$ ) (Farquhar et al., 1980, Caemmerer, 2000)

$$A = \min(A_c, A_j, A_s) \quad (4.11)$$

Neste modelo não foi considerada a limitação pela utilização de trioses fosfato ( $A_t$ ) (Sharkey, 1985; Caemmerer, 2000), uma vez que os dados não apresentaram um declínio da assimilação em alto  $C_i$ , característico desta limitação. Neste sentido considerou-se apenas o  $A_c$  e o  $A_j$ :

$$A_c = ([V_{c_{\max}} (C_i - \Gamma^*)] / [C_i + K_c (1 + O / K_o)]) - R_d \quad (4.12)$$

$$A_j = ([J_{\max} (C_i - \Gamma^*)] / [4C_i + 8 \Gamma^*]) - R_d \quad (4.13)$$

O cálculo da taxa máxima de transporte de elétrons ( $J_{\max}$ ) foi realizado resolvendo a equação que descreve os pontos de  $A_j$ .

Os valores das constantes cinéticas da reação de carboxilação ( $K_c$ ) e da reação de oxigenação ( $K_o$ ) da enzima Rubisco utilizados foram  $K_{c_{25}} = 404 \mu\text{bar}$ ,  $K_{o_{25}} = 248 \text{ mbar}$  a  $25^\circ \text{ C}$  (CAEMMERER, 2000). Para corrigir as constantes cinéticas em função da temperatura medida na folha em graus Celcius ( $T_m$ ) foi utilizada a equação de Arrhenius:

$$K_{c(T_m)} = K_{c_{25}} e^{(59400 (T_m - 25) / (8,314 * 298,15 * (T_m + 273,15)))} \quad (4.14)$$

$$K_{o(T_m)} = K_{o_{25}} e^{(36000 (T_m - 25) / (8,314 * 298,15 * (T_m + 273,15)))} \quad (4.15)$$

Os valores 59400 e 36000 representam a energia de ativação das respectivas constantes ( $K_{c_{25}}$  e  $K_{o_{25}}$ ) ( $\text{J mol}^{-1}$ ) e 8,314 é a constante universal dos gases ( $\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ) (CAEMMERER, 2000).

O valor do ponto de compensação de  $\text{CO}_2$  na ausência de respiração no escuro ( $\Gamma^*_{25}$ ) foi considerado de  $36,9 \mu\text{mol mol}^{-1}$  a  $25^\circ \text{ C}$ , corrigido para temperatura conforme Brooks & Farquhar (1985):

$$\Gamma^* = \Gamma^*_{25} + 1,88 (T_m - 25) + 0,036 (T_m - 25)^2 \quad (4.16)$$

Na estimativa do  $V_{c_{\max}}$  foi utilizada a inclinação inicial ( $\alpha$ ) da reta da taxa de assimilação líquida em função do  $C_i$  ( $C_i < 200$ ) sobre 4 pontos obtidas da equação diferencial de Caemmerer (2000), sendo que  $dA / dC$  é linearmente relacionado a  $V_{c_{\max}}$  (CAEMMERER; FARQUHAR, 1981).

$$\frac{dA}{dC} = V_{c_{\max}} \frac{\Gamma^* + K_c (1 + O / K_o)}{[C + K_c (1 + O / K_o)]^2} \quad (4.17)$$

A inclinação ( $\alpha$ ) é chamada de “eficiência de carboxilação” e  $V_{c_{\max}}$  é dado por

$$V_{c_{\max}} = \frac{\alpha([c_i]K')^2}{(\Gamma^* + K')} \quad (4.18)$$

e  $K'$  é a constante cinética da reação de carboxilação em 200 mbar de  $O_2$  e é estimada pela equação:

$$K' = K_{c(T_m)} (1 + O) / K_{o(T_m)} \quad (4.19)$$

Onde  $O$  é a pressão de  $O_2$  em 200 mbar (CAEMMERER, 2000).

O decréscimo da fotossíntese pode ocorrer frequentemente pela diminuição na condutância estomática foliar. Contudo, isto não significa necessariamente que os estômatos são mais limitantes para a fotossíntese. Neste sentido, procurou-se quantificar a limitação estomática pelo método proposto por Farquhar e Sharkey (1982), descrito com maiores detalhes em Long e Bernacchi (2003) que utiliza para o cálculo os dados das curvas  $A/C_i$ . Se uma folha possui como uma taxa fotossintética  $A'$  em uma concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ) devido a uma dada concentração atmosférica de  $CO_2$  ( $C_a$ ), podemos prever que uma assimilação hipotética ( $A''$ ) seria possível quando ocorre o livre acesso de  $CO_2$  do ambiente, isto é, quando a condutância seria infinita ( $g_s = \infty$ ) e o  $C_i$  seria igual ao  $C_a$ .

Desta forma a limitação imposta pela condutância ( $L$ ) é dada pela equação

$$L = (A'' - A') / A'' \quad (4.20)$$

onde,  $A'$  é a assimilação em relação a quantidade de  $C_i$  e  $A''$  é a assimilação estimada considerando o  $C_i$  igual ao  $C_a$ .

#### 4.2.6. Campanhas

Foi escolhida a espécie ***Poincianella microphylla* (Mart. ex G. Don) L.P. Queiroz** (nome vulgar: catingueira falsa, catingueira da folha miúda ou simplesmente catingueira) porque tem uma alta ocorrência nessa área de Caatinga e pertence à família *Fabaceae* o que representa 50,63% das espécies na área (DRUMMOND et al., 2002).

Na primeira campanha, entre 9 e 14 de abril de 2012, seguindo a orientação da análise de *footprint* da torre, num ângulo de  $125^{\circ}$  sudeste e numa distância de 120 m. a partir da torre, foram escolhidos 11 indivíduos de catingueira da folha miúda (Figura 4.6) que foram demarcados e georeferenciados através do Sistema de Posicionamento Global (GPS) e a altura destes indivíduos foi estimada entre 1,70 a 4,5 m. de altura (Tabela 4.2).

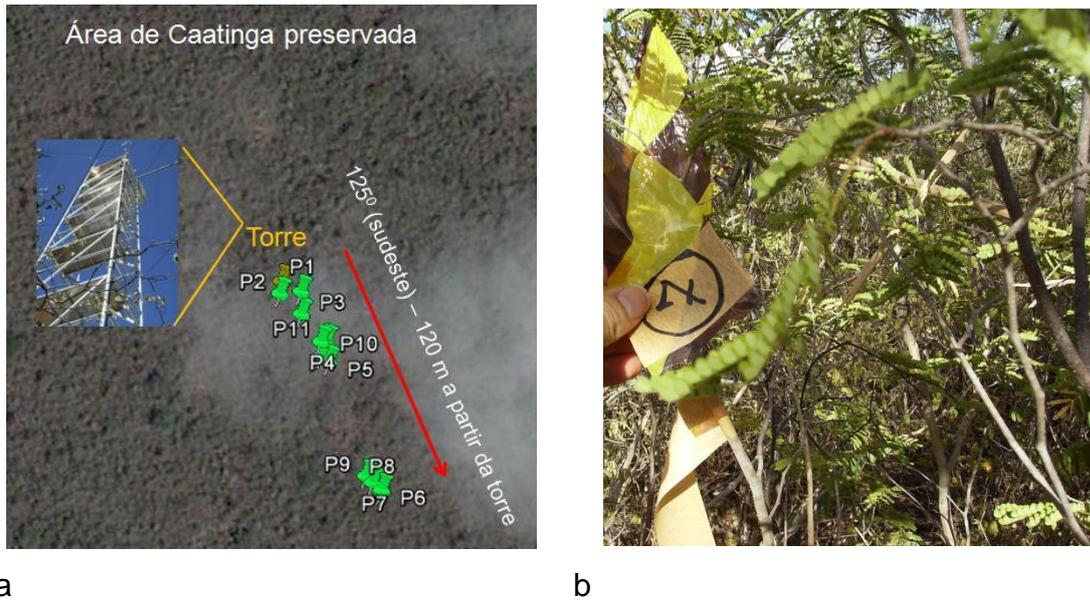


Figura 4.6 a Indivíduos de *P. microphylla* distribuídos a partir da torre com equipamentos meteorológicos – imagem realizada com o auxílio do aplicativo *Google Earth*; b um indivíduo de *P. microphylla* demarcado.

Tabela 4.2 Posicionamento dos indivíduos de Catingueira

Planta	Lat.	Long.	Altura (~)(m)	Altitude (m)
P1	9° 2' 47,5722" S	40° 19' 16,4274" O	2,50	386,6
P2	9° 2' 47,5872" S	40° 19' 16,7442" O	1,90	388,5
P3	9° 2' 47,904" S	40° 19' 16,4352" O	3,00	391,4
P4	9° 2' 48,3246" S	40° 19' 16,1616" O	3,10	387,8
P5	9° 2' 48,6234" S	40° 19' 16,0458" O	3,20	390,2
P6	9° 2' 50,5356" S	40° 19' 15,3228" O	1,70	387,8
P7	9° 2' 50,4342" S	40° 19' 15,4554" O	2,20	387,8
P8	9° 2' 50,5638" S	40° 19' 15,3408" O	3,15	388,7
P9	9° 2' 50,3304" S	40° 19' 15,5562" O	2,85	387,8
P10	9° 2' 48,3138" S	40° 19' 16,0716" O	2,25	389,7
P11	9° 2' 48,3138" S	40° 19' 16,0716" O	4,50	389,7
Torre	9° 2' 47,4144" S	40° 19' 16,7154" O	16,0	394,1

Indivíduos de *P. microphylla* que foram georreferenciados em 2012 e acompanhados nas campanhas de 2012, 2013 e 2014.

Medidas fisiológicas foram realizadas sobre esses 11 indivíduos nos períodos de 4 a 8 de fevereiro de 2013; e de 22 a 26 de fevereiro de 2014. Para as medidas foi utilizando um analisador de fotossíntese e fluorescência LI-6400 XTR (Li-Cor, Nebraska, EUA) e foram escolhidas folhas completamente expandidas e expostas ao sol. Os horários de medições foram entre 7:00 h e 15:00 h (hora local). Curvas de resposta de assimilação líquida de CO<sub>2</sub> em relação à luz (AXPAR) foram realizadas com o objetivo de identificar o ponto de saturação fotossintética para cada uma das plantas. Os pontos utilizados nas curvas de luz foram entre 0 e 1500  $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e a concentração de CO<sub>2</sub> utilizada foi de 400 ppm (BLOOM et al., 1980; LONG; HÄLLGREN, 1993). As curvas de resposta fotossintética à variação do CO<sub>2</sub> (AxC<sub>i</sub>) foram realizados sob luz (*Light Emitting Diode*- LED), fonte (vermelho-azul, 10% azul) definido para radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de 800  $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  que foi o valor encontrado de saturação. As concentrações de CO<sub>2</sub> utilizadas nessas curvas A x C<sub>i</sub> foram entre 50 e 1200  $\mu\text{mol.mol}^{-1}$ .

Foram realizadas coletas de sementes de *P. microphylla* entre os dias 9 e 14 de abril de 2012 na região e ao longo da estrada na área de estudo da Embrapa-CPATSA até ser conseguido um número de aproximado de 200 sementes dessa espécie para ser utilizada no experimento no LAFIECO-USP.

Outras sementes foram coletadas no dia 30 de abril de 2012 em 11 matrizes de *P. microphylla* localizadas na Fazenda Experimental do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Vale do São Francisco, em Petrolina, Pernambuco (09°19'28,40"S 40°35'55,50"O 389 metros de altitude). Desta forma foram conseguidas em torno de 500 sementes desta espécie.

Foram realizadas as medidas de potencial hídrico através da câmara de Scholander. Para isso, foram retiradas folhas próximas à folha em que foram realizadas as curvas de luz e CO<sub>2</sub>.

#### **4.2.7. Escolha do Tipo Funcional de Planta**

A simulação foi configurada com apenas 1 TFP: **arbustos decíduos**, apesar de existir a presença de vegetação sempre verde na seca e o INLAND disponibilizar o TFP **arbustos sempre verdes**. Segundo o Dr. Saulo de Tarso, em comunicação pessoal, é muito pouco significativa a contribuição de arbustos sempre verdes durante o período de seca.

Também não foi incluído na configuração um TFP para gramíneas. A Caatinga é um bioma em que quase não se observa a presença de gramíneas segundo o Dr. Everardo Sampaio em comunicação pessoal. E acrescentou que apesar de se plantar capins africanos na Caatinga, a ausência das gramíneas pode ser atribuída à presença de herbívoros domésticos em quase todos os lugares devido à alta densidade populacional do bioma. Para gramíneas nativas, Giuletti et al. (2002) registram apenas 2 espécies endêmicas: *Neesiochloa barbata* (Nees) Pilger e *Panicum caatingense* Renvoize.

### 4.3. Modelagem

#### 4.3.1. Definição das variáveis (dependente e independentes)

Os dados foram organizados em um banco de dados (DB) (Figura 4.8) e foram utilizadas variáveis ambientais como variáveis independentes que têm boa (ou razoável) correlação (ou anti-correlação) com a fotossíntese, como déficit de pressão de vapor entre folha e o ar ( $DPV_F$ ), temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e radiação fotossinteticamente ativa ( $Par_o$ ) medida no ambiente, e não a que é injetada na câmara pelo equipamento IRGA 6400. Apesar do déficit de pressão do vapor (DPV) ser usado como um indicador de disponibilidade de água, DPV e umidade do solo nem sempre são covariantes (BEER et al., 2009). No entanto, o déficit de pressão de vapor e a umidade do solo são as variáveis ambientais mais importantes que influenciam diretamente o potencial de água da folha (SANTOS et al., 2014). As medidas foram realizadas após as chuvas, assumiu-se que a umidade do solo foi de 100% (Figura 4.7), e  $V_{c_{max}}$  é a variável dependente que é calculada pelo INLAND a partir da equação:

$$V_{c_{max}} = Vc \cdot stresstl \quad (4.21)$$

Onde  $Vc$  é um valor inicial de velocidade máxima de carboxilação que no INLAND é fixo para cada Tipo Funcional de Planta (TFP) (Tabela 3.3) e  $stresstl$  é o fator de estresse hídrico calculado a partir da disponibilidade de água (ou umidade) no solo que é alimentado pela quantidade de precipitação. Esse valor pode ser de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo o valor for de 0, maior é o estresse; e também o contrário, quanto mais próximo de 1, menor é o estresse hídrico.

$$stresstl = \frac{(1 - e^{fs-awc})}{1 - e^{fs}} \quad (4.22)$$

Onde  $e$  é exponencial,  $awc$  é a conteúdo de disponibilidade de água (*available water content*) e  $fs$  é o fator de estresse máximo (limite negativo), recebendo o valor como *default*,  $fs = -5$ .

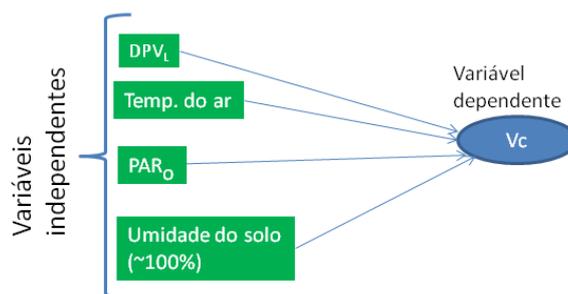


Figura 4.7 Definição das variáveis independentes e dependente.

Na metodologia aplicada a este trabalho esse valor inicial de  $V_c$  foi obtido a partir dos dados de  $V_{c_{max}}$  medidos em campo, considerados apenas valores de  $V_{c_{max}} \leq 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  que foram inseridos numa base de dados e depois calibrados com a aplicação dos métodos CART, K-MEANS e através de regressão (MLR) (Figura 4.8). Portanto, esse valor inicial não é constante, como é definido no INLAND, pois varia de acordo com as condições ambientais: déficit de pressão de vapor e temperatura do ar.

As regras e árvores de classificação derivadas da aplicação dos algoritmos CART e K-MEANS e a equação de regressão obtida em MLR foram implementadas no código do INLAND, no módulo **inland\_stomataib.F90** conforme esquema mostrado na Figura 4.8. Após essas implementações o INLAND foi executado no modo operacional **OD** (*single point*) *off-line* (não acoplado a um MCGA) como concebido por Delire e Foley (1999) e utilizou dados forçantes de 2011: radiação solar incidente, radiação de onda longa incidente, temperatura do ar, velocidade horizontal do vento, precipitação e umidade relativa do ar.

O INLAND não calibrado tem o valor de  $V_{c_{max}}$  para um TFP para arbustos decíduos como  $27,5 \times 10^{-6} \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (KUCHARIK et al., 2000).

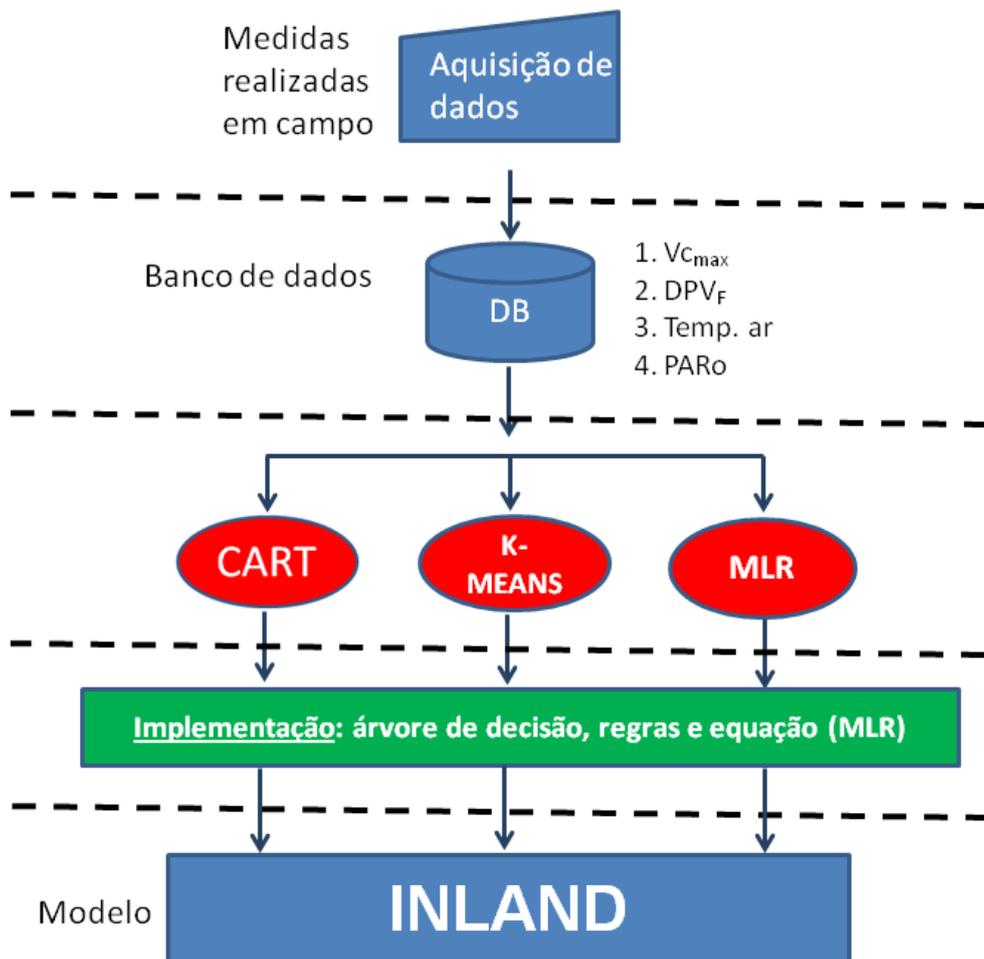


Figura 4.8 Esquema da modelagem para a calibração do  $V_{c_{max}}$ : aquisição de dados, implementação de banco de dados, a calibração (CART, K-MEANS, MLR), implementação das regras geradas e equações no código do modelo INLAND

#### 4.3.2. Algoritmos de mineração de dados

Mineração de dados é definida como o processo de descobrir padrões em dados. Um padrão pode ser definido como um evento/característica ou combinação de eventos numa base de dados sendo expresso tipicamente por um conjunto de variáveis com determinados valores discretos ou contínuos. A identificação de um padrão associado a um evento pode permitir que seja feita uma predição sobre sua ocorrência futura (WITTEN; FRANK, 2000; HAN; KAMBER, 2001). A mineração de dados é uma área multidisciplinar que

envolve banco de dados, estatística, matemática, inteligência artificial, reconhecimento de padrões, visualização de dados e sistemas distribuídos.

A escolha dos algoritmos CART e K-MEANS foi devido a sua natureza não supervisionada, ou seja, o agrupamento/classificação ocorre de forma natural pela semelhança dos dados, sendo que os algoritmos inferem por eles mesmos as classificações e agrupamentos, sem que sejam treinados a partir de respostas consideradas corretas ou classes previamente definidas (WITTEN; FRANK, 2000). Outra razão para a escolha desses algoritmos foi a sua robustez diante da reduzida amostragem de dados, uma vez que esses algoritmos fornecem como saídas de suas inferências valores médios. Esses valores médios poderão ser obtidos a partir de uma série de condições ambientais e ser classificados seguindo uma árvore de decisão (como CART); ou poderão derivar de médias de grupos de dados que foram agrupados segundo uma tendência natural desses dados.

Isto permitiu obter um valor não constante de  $V_{C_{max}}$  que varia de acordo com as condições ambientais.

#### **4.3.2.1. Classification and Regression Tree (CART)**

A Árvore de Decisão é um algoritmo de classificação supervisionada em que um dos resultados consiste em um conjunto de regras encadeadas do tipo “SE ENTÃO”, que formam uma estrutura hierárquica semelhante à de uma árvore. Trabalha em cima de uma base de dados e determina a classe, com base nos atributos de entrada. Os componentes desta estrutura, basicamente, são:

- a) Nós: onde as instâncias são distribuídas segundo regras que testam um dado atributo;
- b) Ramos: interligam os nós, expressando a distribuição de instâncias decorrente da regra aplicada no nó do qual descendem;
- c) Folhas: nós terminais que expressam a classificação final das instâncias.

O algoritmo genérico para a criação de uma árvore de decisão primeiramente testa todos os atributos para a criação de um nó da árvore.

Um dos critérios para se escolher o atributo para um nó é a escolha do atributo que tem maior ganho de informação (seção a seguir explica o cálculo do ganho de informação) e faz-se um ramo para cada valor possível do atributo. Em seguida, para cada subconjunto de dados que atinge um determinado ramo, aplica-se a mesma regra recursivamente. E é repetido até não ser mais possível decidir por atributos ou quando atingiu algum dos critérios de parada.

Quando aumenta muito a complexidade da árvore, em muitos casos, pode haver a necessidade de podar (*prunning*) a árvore para reduzir a complexidade e facilitar a interpretação. Ainda na construção da árvore de decisão, muitos dos ramos irão refletir anomalias no conjunto de treinamento devido a dados ruidosos ou *outliers*. O ramo corresponde a um possível valor do atributo.

Este método utiliza medidas estatísticas para remover ramos menos confiáveis, resultando, geralmente, numa classificação mais rápida e numa melhoria da capacidade da árvore classificar corretamente os dados de testes.

Os algoritmos para a construção de árvores de decisão têm tido muito sucesso nas áreas de aprendizagem de máquina e de mineração de dados porque são rápidos, efetivos e não precisam da preparação dos dados.

a) Descrição genérica do algoritmo:

1. São testados todos os atributos para a criação de um nó da árvore. É escolhido o atributo que tem maior ganho de informação.
2. A árvore é dividida através do atributo selecionado (são criados nós e sub-árvores).
3. É repetido recursivamente até não ser mais possível decidir por atributos.

b) Cálculo do ganho de informação

A medida do ganho de informação é utilizada para selecionar o atributo através de testes em cada nó da árvore. O atributo com mais alto ganho de informação é escolhido para testar o atributo no nó corrente.

Este atributo minimiza a necessidade de informação para classificar as amostras e reflete menor aleatoriedade nos dados. Este método também diminui o número de testes necessários para classificar um objeto.

Han; Kamber (2001) descrevem a seguir o método e as equações para o cálculo do ganho de informação.

Considere  $S$  como um conjunto de observações  $s$  de dados. Suponha que tenha  $m$  classes distintas,  $C_i$  (para  $i=1, \dots, m$ ). Faça  $s_i$  o número da instância de  $S$  na classe  $C_i$ . A informação necessária para classificar uma amostra é dada por

$$I(s_1, s_2, \dots, s_m) = -\sum_{i=1}^m p_i \log_2(p_i) \quad (4.23)$$

Onde  $p_i$  é a probabilidade de uma instância pertencer a classe  $C_i$  e é estimada por  $s_i / s$ . A função logarítmica é utilizada na base 2, desde que a informação seja dada em bits.

Considere que o atributo  $A$  tenha  $v$  valores distintos,  $\{a_1, a_2, \dots, a_v\}$  pode ser utilizado para dividir  $S$  nos sub-conjuntos  $\{S_1, S_2, \dots, S_v\}$ , onde  $S_j$  contém essas amostras em  $S$  que tenha valor  $a_j$  de  $A$ . Considere  $S_j$  contém  $s_{ij}$  amostras da classe  $C_i$ . A informação esperada nesta divisão é conhecida como a entropia de  $A$ .

$$E(A) = \sum_{j=1}^v \frac{s_{j1} + \dots + s_{jm}}{s} I(s_{j1}, \dots, s_{jm}) \quad (4.24)$$

O ganho da informação é definido por

$$Ganho(A) = I(s_1, s_2, \dots, s_m) - E(A) \quad (4.25)$$

#### 4.3.2.2. K-MEANS

Foi utilizada a implementação do método K-MEANS no aplicativo **Weka** versão 3.7.1, que é um *software* livre (WITTEN; FRANK, 2000). Na aplicação do método K-MEANS, os dados foram normalizados de tal maneira que os valores ficaram entre 0 e 1. O objetivo da normalização nesse caso, é de que alguns atributos com maior magnitude poderiam influenciar mais do que outros para o cálculo da distância entre eles e os centroides. A normalização foi realizada conforme a equação

$$z_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (4.26)$$

Onde  $(x_1, \dots, x_n)$  é a amostra de dados e  $z_i$  é o  $i^{\text{ésimo}}$  dado normalizado.

Na aplicação do método foi definido, após a análise dos dados (o método foi executado com 2, 4, 5 e 6 grupos diferentes) que a classificação em 5 grupos diferentes teria uma distribuição razoável dos dados. Através do cálculo da menor distância euclidiana entre os pontos e os valores médios de cada um dos atributos ( $V_{C_{\max}}$ , temperatura do ar,  $DPV_F$ ) foram calculados os centroides para cada um desses atributos, de cada grupo como O algoritmo de K-MEANS é descrito de forma genérica a seguir:

- a) Os centroides dos K grupos são inicializados;
- b) Cada instância é marcada como pertencente ao grupo (centróide) mais próximo;
- c) Os centroides dos grupos são recalculados considerando as pertinências;
- d) O erro quadrático total é recalculado. As condições de parada são verificadas e os passos são repetidos a partir do passo b.

As condições de parada podem ser: o número de iterações para o algoritmo já foi cumprido; foi conseguido um valor de erro quadrático abaixo de um limiar; nenhuma mudança ocorre mais nas pertinências entre uma iteração e outra.

### 4.3.3. Parametrização de alocação de biomassa

As proporções das biomassas das partes das plantas em relação à biomassa total se desenvolvem de forma mais ou menos proporcional ou harmoniosa (SILVA & SAMPAIO, 2008; KING, 2005; POORTER et al., 2012) A Tabela – 4.3 mostra porcentagens de biomassa seca (toneladas / ha) das partes de indivíduos (folhas, caules e raízes) com 8 anos de idade localizados na área da Embrapa – CPTSA da espécie *Mimosa tenuiflora* (DRUMMOND et al., 2008) que pertence à família das *Fabaceae*, assim como a *P. microphylla*. Essas porcentagens são comparadas com a configuração original do INLAND (NÃO CALIBRADO) para o TFP: arbusto decíduo.

Tabela 4.3 – Alocação de biomassa

MÉTODO	Aloc. Folhas e Galhos (%)	Aloc. Caules (%)	Aloc. Raízes (%)
NÃO CALIBRADO	45	35	20
Drumond et al. (2008)	33	44	23

### 4.3.4. Parametrização de concentração atmosférica

O modelo INLAND foi parametrizado para as atuais concentrações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> conforme a Tabela 4.4 que são os valores iniciais para as simulações até o ano de 2100. As concentrações se alteram no decorrer da simulação (decorrer dos anos).

Tabela 4.4 - Concentrações atmosféricas iniciais de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>

Gás	Concentração (mol/mol)
CO <sub>2</sub>	0,000400
O <sub>2</sub>	0,209000

#### 4.3.5. Projeções do INLAND seguindo as RCPs

Tendo como objetivo testar a sensibilidade do modelo ao CO<sub>2</sub>, após as calibrações de  $V_{C_{max}}$ , o INLAND 1.0 *off line* utilizando o método K-MEANS e executado do ano 2016 até 2100 em quatro cenários para *Representative Concentration Pathways* (RCPs) para o sítio do experimento de Caatinga, em Petrolina (0D), e para o Nordeste Brasileiro (2D - grade) nos domínios: latitudes -3 e -18; e longitudes: -48 e -33- levando em conta apenas o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>. Esse domínio inclui uma parte leste do estado do Pará, norte de Minas Gerais, parte leste de Goiás e parte do leste de Tocantins. Os dados da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico estimados para os quatro cenários de emissões (RCP3, RCP4.5, RCP6, RCP8.5) pelos modelos foram obtidos em RCP Database(2014). As RCPs utilizaram um conjunto de dados históricos de emissões para inicializar os modelos. Cada uma das RCPs mostra uma tendência de crescimento ou estabilização das emissões que foram estimadas pelos modelos com as prováveis consequências como o aumento da temperatura e a elevação do nível do mar (WAYNE, 2013) (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 *Representative Concentration Pathways* (RCPs)

Cenário	Forçante radiativa	Concentração (p.p.m.)	Tendência	Modelo aplicado	Aumento de temperatura (faixa)	Aumento do nível do mar (faixa)
RCP 8.5	>8,5 W m <sup>-2</sup> em 2100	> 1230 CO <sub>2</sub> equiv. em 2100	Crescente	MESSAGE	3,2-5,4°C	0,45-0,82m
RCP 6.0	~6 W m <sup>-2</sup>	~850 CO <sub>2</sub> equiv.– estabilização após 2100	Estabilização sem superação	AIM	2,0-3,7°C	0,33-0,63m
RCP 4.5	~4,5 W m <sup>-2</sup>	Pico em ~650 CO <sub>2</sub> equiv. antes de 2100 e declina	Estabilização sem superação	GCAM	1,7-3,2°C	0,32-0,63m
RCP 2.6	~3,0 W m <sup>-2</sup>	~490 CO <sub>2</sub> equiv. antes de 2100 e declina	Pico e declina	IMAGE	0,9-2,3°C	0,26-0,55m

Estimativas do IPCC (2014) para o ano de 2100 conforme as RCPs 3, 4.5, 6 e 8.5

Seguindo as concentrações dos cenários mais otimistas RCP 2.6 a concentração de CO<sub>2</sub> deve crescer até ~457 ppm em 2045, ocorrendo na sequência uma diminuição, e em 2100 deve atingir 427 ppm; e na estimativa

mais pessimista (RCP 8.5) há um aumento da concentração que deve ultrapassar ~1.230 CO<sub>2</sub> equiv. em 2100 (Figura 4.9)

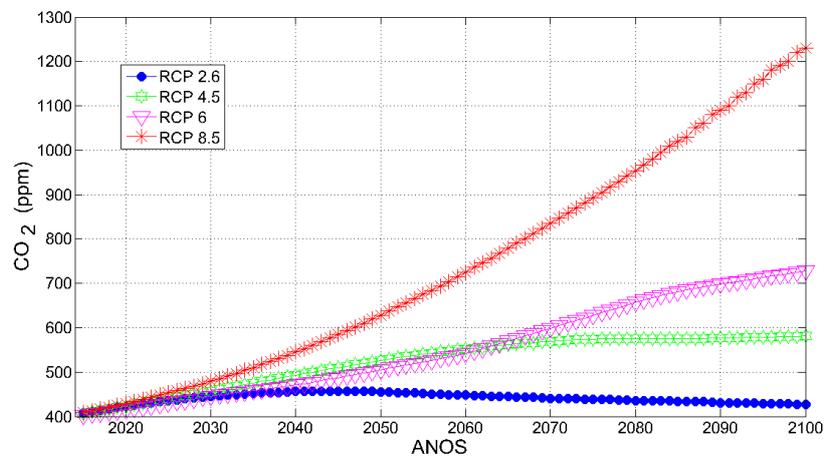


Figura 4.9 Cenários (IPCC-RCPs) de emissões de CO<sub>2</sub> do ano 2015 até 2100



## 5. RESULTADOS: EXPERIMENTO EM CÂMARAS DE TOPO ABERTO

### 5.1. Resultados do experimento no LAFIECO-USP

A seguir são descritos os resultados do experimento na USP, no Laboratório de Fisiologia Ecológica de Plantas (LAFIECO) com o cultivo de 45 indivíduos de *P. microphylla* em câmaras de topo aberto (OTCs) em condições de CO<sub>2</sub> atmosférico e estresse hídrico conforme o desenho do experimento que foi descrito no Capítulo 4.

### 5.2. Condições experimentais

Os dados de umidade relativa (UR) (médias) e temperatura do ar (médias) dentro das câmaras (OTCs) para o período de 30 de janeiro de 2013 até 18 de abril de 2013 no local do experimento são mostrados na Figura 5.1.

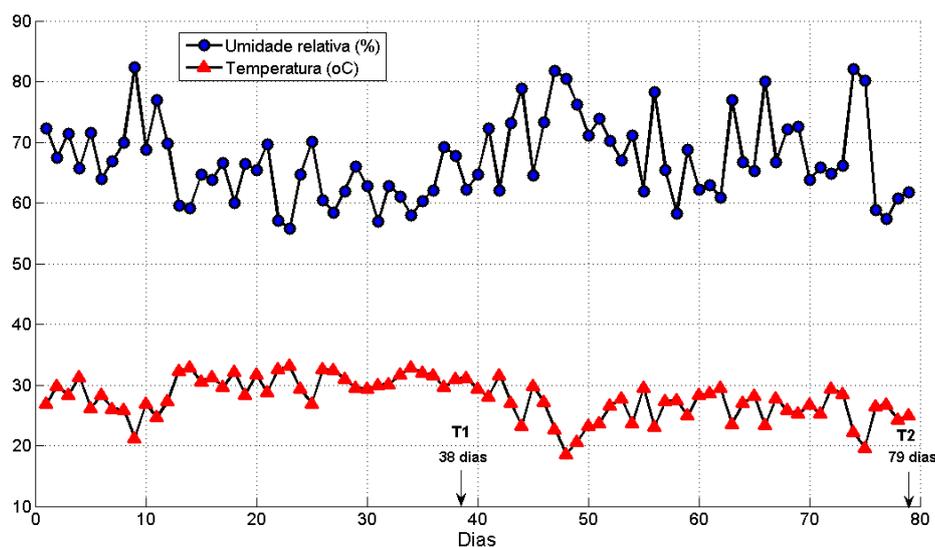


Figura 5.1 – Registro das médias das temperaturas do ar e umidade relativa do ar dentro das câmaras (OTCs) para o período do experimento de cultivo com elevada concentração de CO<sub>2</sub> (30 de janeiro a 18 de abril de 2013) constando os tempos das coletas e medidas de trocas gasosas: T1 (38 dias) e T2 (79 dias) no LAFIECO-USP

A Figura 5.2 mostra a umidade do solo durante os dias do experimento para os quatro tratamentos (**ambiente/seco**, **elevado/seco**, **ambiente** e **elevado**).

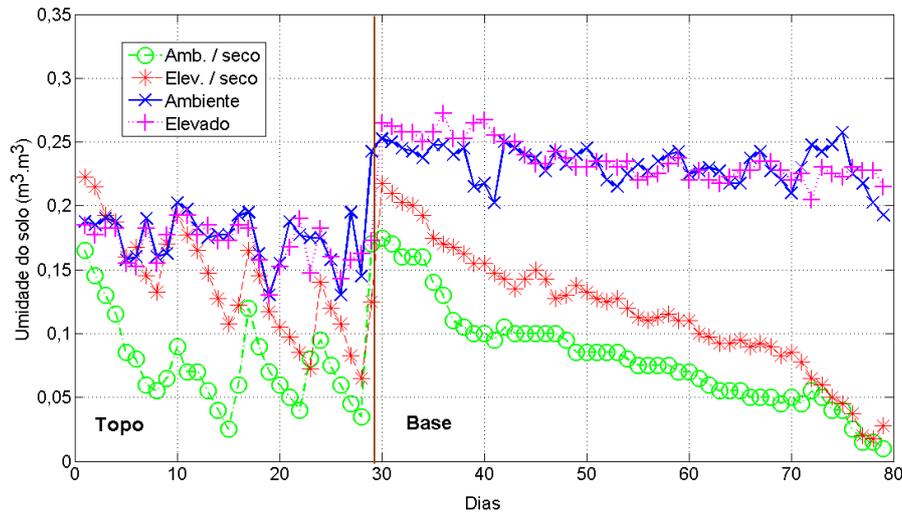


Figura 5.2 Umidade do solo para os quatro tratamentos durante o período do experimento de cultivo com elevada concentração de CO<sub>2</sub> (30 de janeiro a 18 de abril de 2013) – no LAFIECO-USP – com os valores médios dos sensores de umidade de solo de cada câmara (OTC). Topo (os sensores estavam na parte superior do vaso) –a partir do vigésimo nono dia do experimento (linha vertical): os sensores foram deslocados para a parte inferior do vaso (Base).

### 5.2.1. Trocas gasosas

Os resultados das curvas AxC<sub>i</sub> e AxC<sub>PAR</sub> são mostrados na Tabela 5.1 com os valor médio, erro padrão da média e a diferença significativa para cada parâmetro em cada um dos tratamentos e no tempo em que foram realizadas as medidas: T1= 38 dias e T2=79 dias.

Tabela 5.1 Parâmetros de trocas gasosas obtidos nas curvas AxPAR e AxCi das plantas de *P. microphylla* sob 4 tratamentos em relação à densidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera e estresse hídrico: 1. ambiente/seco; 2. elevado/seco; 3. ambiente; 4. elevado. Os parâmetros são: A (taxa de assimilação líquida  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); Resp (taxa de respiração no escuro em  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); g<sub>s</sub> (condutância estomática em  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $\Theta$  (convexidade da curva);  $\Phi$  (rendimento quântico aparente); V<sub>cmax</sub> (velocidade máxima de carboxilação da enzima Rubisco  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); J<sub>max</sub> (taxa máxima de transporte de elétrons -  $\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); Ci/Ca (concentração interna de CO<sub>2</sub> e concentração de CO<sub>2</sub> da atmosfera -  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ); Ci (concentração interna de CO<sub>2</sub>  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ). Os valores representam a média aritmética, ( $\pm$  SE) erro padrão da média (n=5). Asteriscos (\*) representam diferença significativa entre os quatro tratamentos (p< 0,05).

T	Tr	A	SE ( $\pm$ )	Resp	SE ( $\pm$ )	g <sub>s</sub>	SE ( $\pm$ )	$\Theta$	SE ( $\pm$ )	$\Phi$	SE ( $\pm$ )	V <sub>cmax</sub>	SE ( $\pm$ )	J <sub>max</sub>	SE ( $\pm$ )	Ci/Ca	SE ( $\pm$ )	Ci	SE ( $\pm$ )
T0	Sem Trat.	6,2	0,83	0,44	0,12	0,042	0,016	0,0001	0,00	0,06	0,0	37,22	3,39	44,49	4,12	0,72	0,02	258,9	10,2
T1	Amb./seco	6,2*	0,44	1,64*	0,08	0,130	0,013	0,39*	0,09	0,07	0,0	63,75*	2,31	67,21*	7,04	0,60*	0,01	248,0*	11,0
T1	Elev./seco	17,9*	0,51	1,66*	0,17	0,138	0,019	0,71*	0,03	0,07	0,0	85,63*	3,72	116,68*	7,39	0,73*	0,03	653,6*	28,9
T1	Ambiente	11,4*	0,45	1,23*	0,09	0,164	0,029	0,24*	0,04	0,07	0,0	71,27*	7,01	102,08*	2,10	0,63*	0,03	253,7*	11,5
T1	Elevado	10,0*	1,23	1,43*	0,09	0,096	0,023	0,52*	0,12	0,07	0,0	26,30*	1,59	46,76*	2,01	0,69*	0,04	623,2*	36,2
T2	Amb./seco	10,0*	0,43	1,96	0,17	0,112	0,010	0,40*	0,10	0,07	0,0	39,98*	7,03	51,79	1,68	0,62	0,05	248,0*	20,4
T2	Elev./seco	9,1*	0,52	1,81	0,03	0,068	0,017	0,54*	0,05	0,07	0,0	57,81*	4,15	53,19	2,18	0,68	0,05	613,2*	53,0
T2	Ambiente	3,7*	0,70	1,39	0,15	0,076	0,017	0,00*	0,00	0,07	0,0	40,67*	3,57	47,47	5,52	0,74	0,02	311,6*	16,0
T2	Elevado	9,7*	0,26	1,72	0,20	0,06	0,019	0,36*	0,11	0,06	0,0	36,36*	4,62	53,08	5,02	0,79	0,02	688,0*	10,3

T0 = início; T1 = 38 dias; T2= 79 dias

Em relação à **assimilação**, houve diferença significativa entre os tratamentos, no entanto em T1 houve um pico de  $17,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  no tratamento **elev./seco**, muito acima dos demais tratamentos, e em T2, diminuiu para  $9,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Figura 5.3).

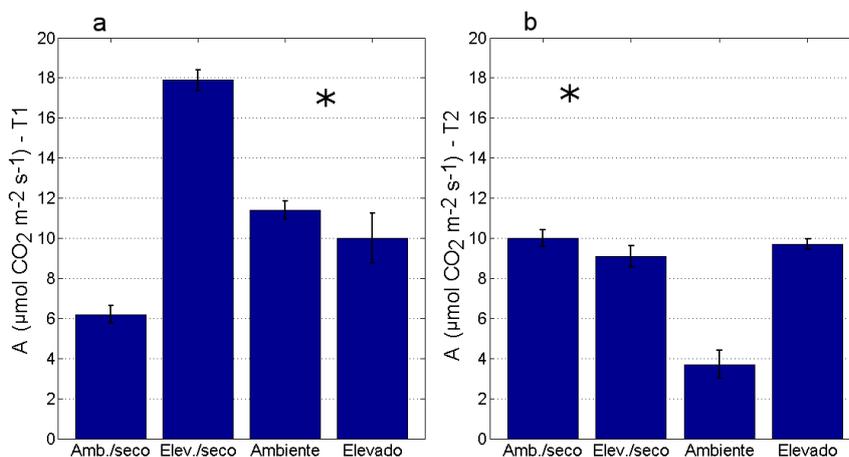


Figura 5.3 Assimilação média, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a.T1 –medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

A razão **C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub>** em T2 foi maior nos tratamentos **elev./seco** e **elevado** em comparação aos tratamentos **amb./seco** e **ambiente**, sugerindo que a concentração de CO<sub>2</sub> nos espaços intercelulares foi maior nas plantas no tratamento **elevado** (Figura 5.4).

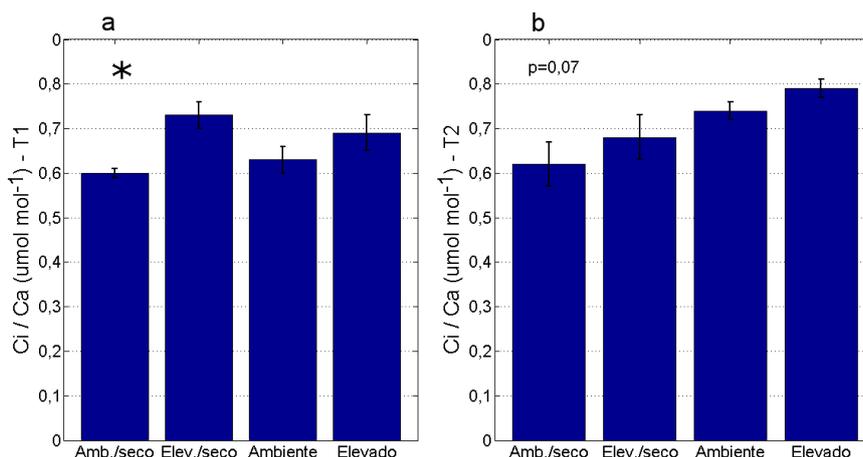


Figura 5.4 Relação Ci/Ca média, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a.T1 –medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

Os valores de  $V_{c_{max}}$  tiveram diferença significativa. Em T1, o valor médio de  $V_{c_{max}}$  para as plantas sob o tratamento **elevado** é muito baixo em comparação aos demais tratamentos (Figura 5.5a). Em T2, com 79 dias de tratamento, os valores médios de  $V_{c_{max}}$  diminuíram em todos os tratamentos, com exceção do tratamento **elevado**, ao se comparar com os valores de T1 (Figura 5.5b).

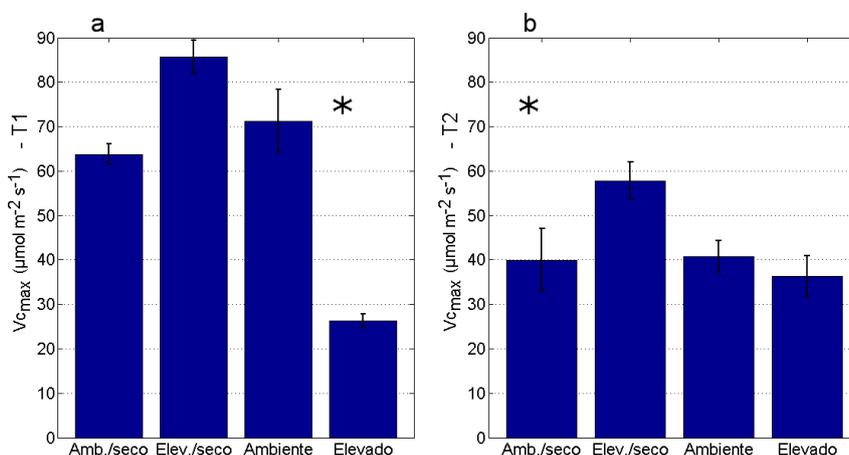


Figura 5.5  $V_{c_{max}}$  média e erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a.T1 – medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

Em relação à **condutância estomática ( $g_s$ )**, apesar de não haver diferença significativa para os tratamentos, observa-se que em T2 houve uma diminuição de 39,3 % para o tratamento **elev./seco** em comparação ao **amb./seco** e de 21% para o tratamento **elevado** em comparação ao tratamento **ambiente** (Tabela 5.1) (Figura 5.6). Isto é condizente com a literatura, em que se descreve o fechamento parcial dos estômatos com a redução da condutância estomática quando existe uma maior disponibilidade de concentração de  $CO_2$  (AINSWORTH; ROGERS, 2007).

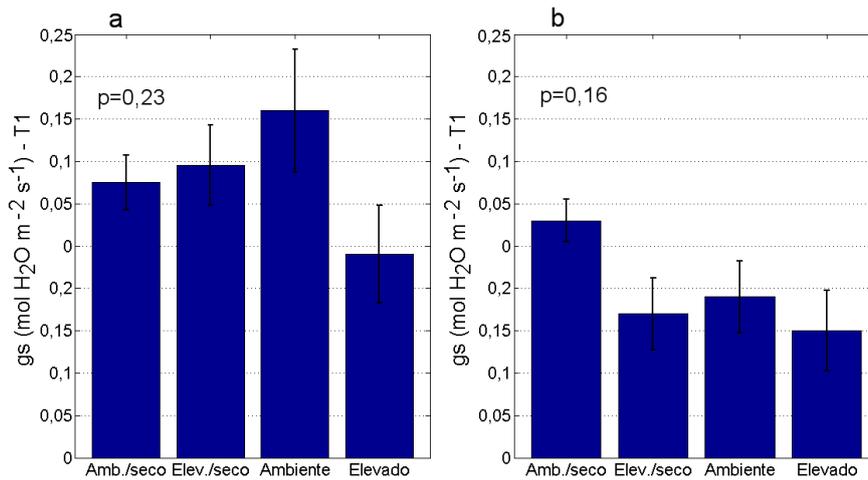


Figura 5.6 Condutância estomática média, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a. T1 –medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

### 5.2.2. Eficiência do Uso da Água (EUA)

Através desses dados foi obtida a Eficiência do Uso da Água (EUA) que pode ser expressa pela razão da assimilação líquida pela condutância estomática ( $EUA = A / g_s$ ) (BEER et al., 2009). Observa-se na Figura 5.7 que a EUA foi maior em tratamentos com alto  $\text{CO}_2$ . Em T1 (38 dias de tratamento), a EUA para os tratamentos: **amb./seco**, **elev./seco**, **ambiente** e **elevado** foi de 48,2, 129,7, 69,5 e 104,4  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$  respectivamente. A melhor EUA em T1 foi para as plantas sob o tratamento **elev./seco** que foi de 19,5% mais do que no tratamento **elevado** e 169% maior do que no tratamento **amb./seco**. Em T2 (79 dias), a EUA para os tratamentos: **amb./seco**, **elev./seco**, **ambiente** e **elevado** foi de 89,8, 133,8, 49,4 e 162,1  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$  respectivamente. No entanto, em T2 houve uma inversão em que a maior EUA foi para plantas sob o tratamento **elevado**, ou seja 17,4% mais alta do que o tratamento **elev./seco**. O tratamento **amb./seco** teve melhor EUA, 44,6% maior do que o tratamento **ambiente**.

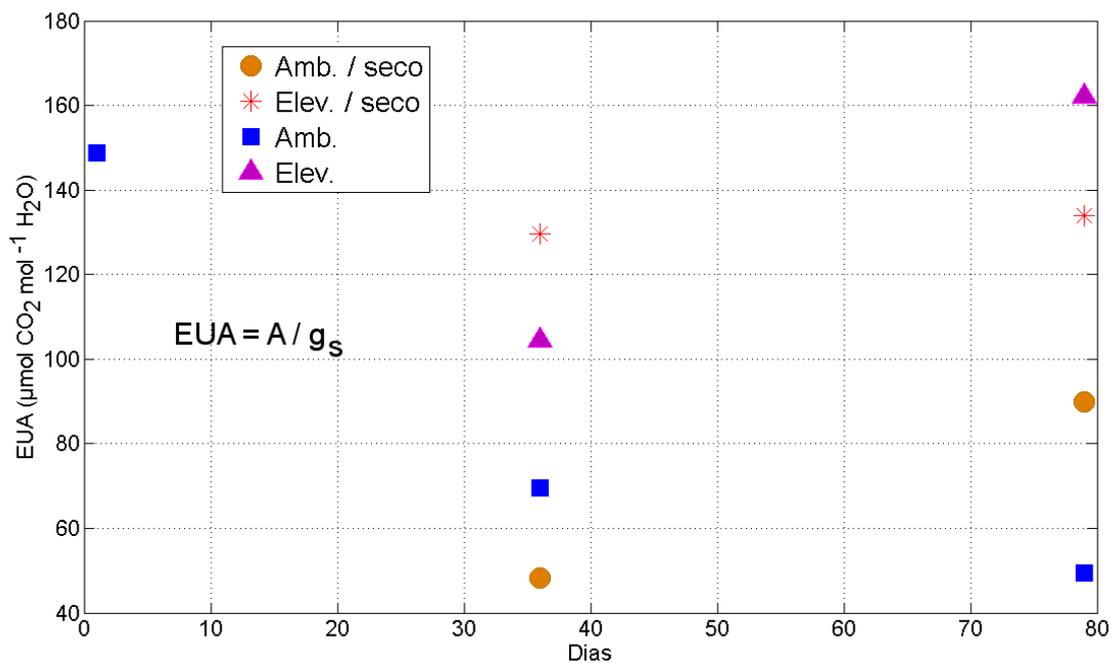


Figura 5.7 EUA média (n=5) para os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; medidas em T0: no primeiro dia do experimento, medidas em T1 com 38 dias de cultivo; medidas em T2 com 79 dias de cultivo.  $EUA = A / g_s$ , onde A (assimilação) e  $g_s$  (condutância estomática)

### 5.2.3. Crescimento e biomassa

Em T1, com 38 dias de cultivo não houve diferença significativa entre os quatro tratamentos para área foliar, número de folhas e altura (Figuras 5.8., 5.9 e 5.10). Na realização da segunda medida (T2), com 79 dias de cultivo, houve significância estatística ( $p < 0,05$ ) para área foliar, número de folhas e altura.

Em relação à área foliar, o tratamento **elevado** foi 35,8% maior do que o tratamento **ambiente** e foi 120% e 111,5% maior do que os tratamentos **elev./seco** e **amb./seco**, respectivamente (Figura 5.8).

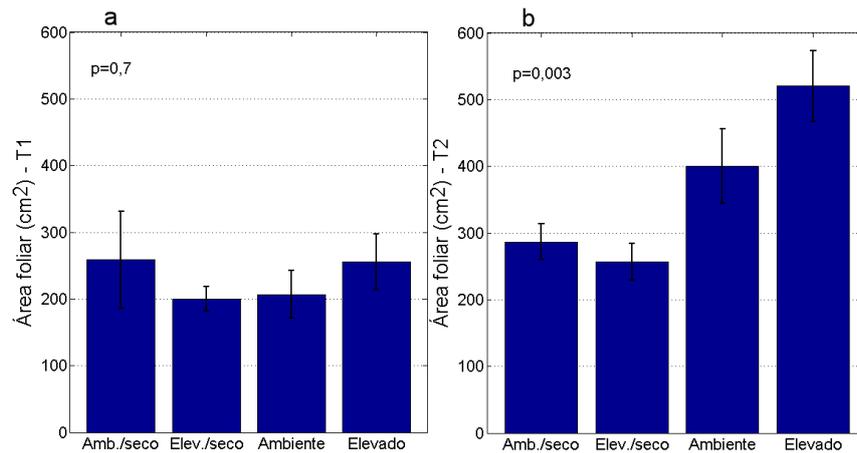


Figura 5.8 Área foliar média, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a. T1 – medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

Em T2, observa-se um maior número de folhas para o tratamento **elevado** em relação aos demais tratamentos. Também foi observada uma diferença significativa no número de folhas no tratamento **elev./seco** em relação ao tratamento **amb./seco** (Figura 5.9).

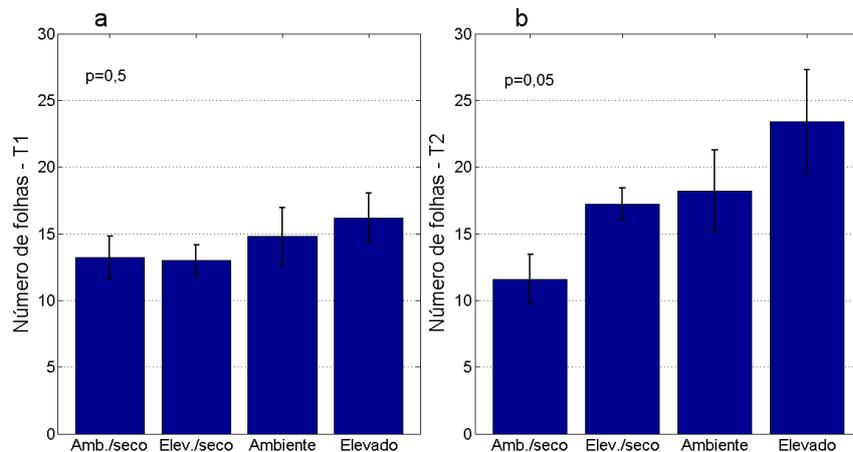


Figura 5.9 Número de folhas média, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a. T1 – medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

Em relação à altura (Figura 5.10), observa-se que em **T2** houve diferença significativa e no tratamento **elevado** houve um aumento na altura em relação os demais tratamentos.

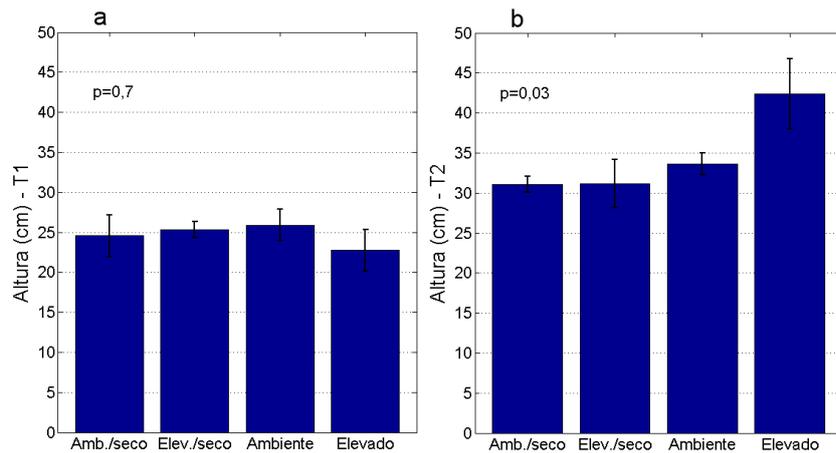


Figura 5.10 Altura média das plântulas, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a. T1 – medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

Em T1, a biomassa seca das folhas, caule e raízes, não apresentaram diferença significativa. No entanto, em T2, com exceção da biomassa seca das raízes, houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

Em relação à biomassa seca da folha, no tratamento **elevado** o ganho foi de 66,6 % em comparação com o tratamento **ambiente**, e foi de 118,7% e 94,4% maior do que os tratamentos **elev./seco** e **amb./seco**, respectivamente (Figura 5.11).

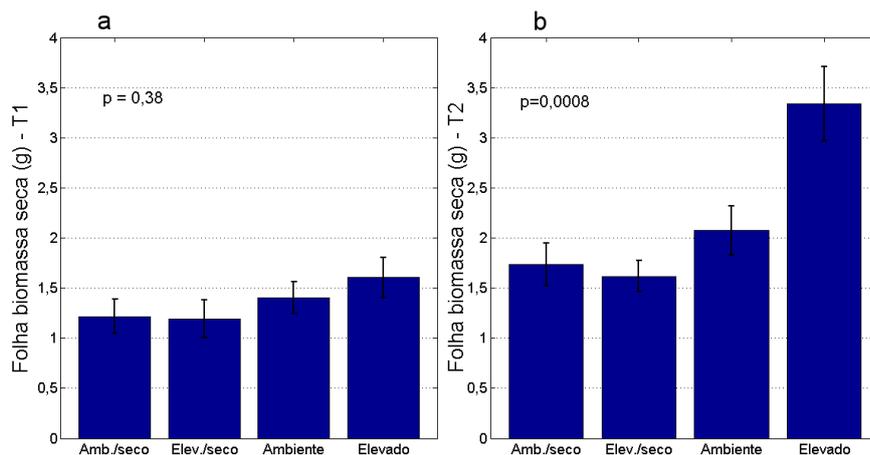


Figura 5.11 Biomassa seca média das folhas, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a. T1 – medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

Em relação à biomassa seca do caule, em T2 houve diferença significativa e no tratamento **elevado** houve maior ganho de biomassa no caule do que nos demais tratamentos. A biomassa do caule de plantas cultivadas em tratamento **elevado** foi maior (72,7%) do que em tratamento **ambiente**, e 137,5% e 58,3% maior do que os tratamentos **elev./seco** e **amb./seco**, respectivamente (Figura 5.12).

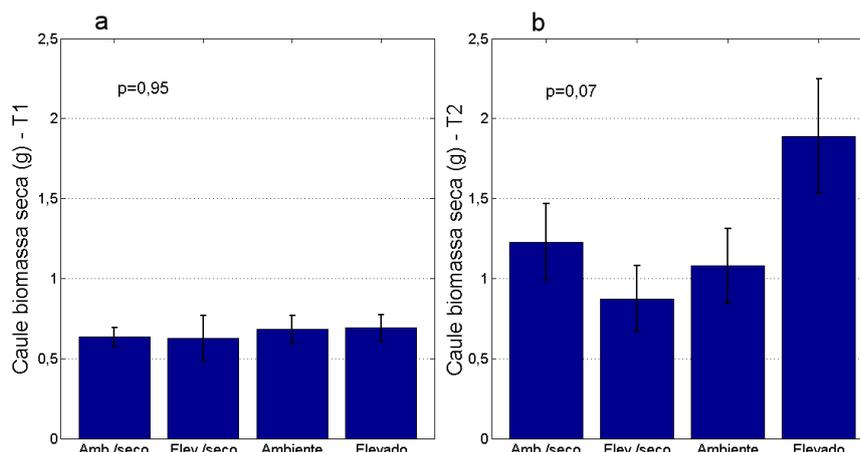


Figura 5.12 Biomassa seca média do caule, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a. T1 –medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

E em relação à raiz, não houve diferença significativa ( $p > 0,07$ ) em T1 e T2. Em T2, no tratamento **elevado** observa-se um maior acúmulo de biomassa do que nos demais tratamentos. Ainda em T2, observa-se um maior acúmulo de biomassa seca para os tratamentos: **amb./seco** e **elev./seco** em comparação ao tratamento **ambiente** (Figura 5.13).

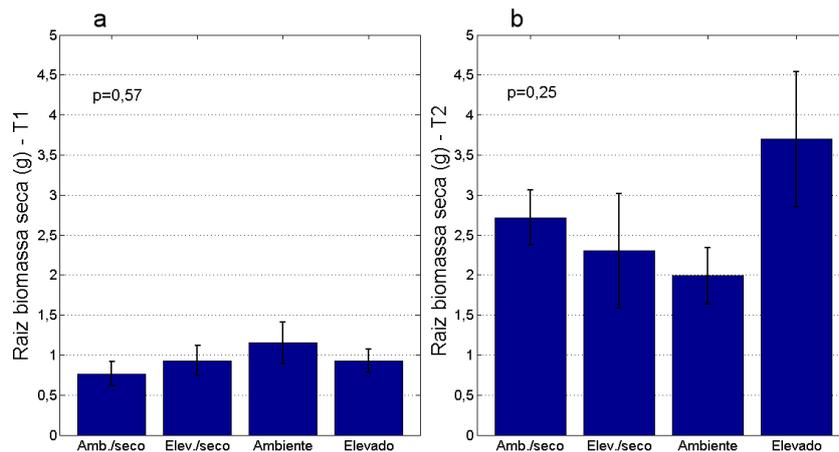


Figura 5.13 Biomassa seca média da raiz, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a. T1 – medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

Nos totais de biomassa seca (Figura 5.14), não houve diferença significativa em T1. No entanto em T2, observa-se que a biomassa seca total para o tratamento **elevado** foi 76,4 % maior do que no tratamento **ambiente** e 114,2 % e 55,1% mais alto do que os tratamentos **elev./seco** e **amb./seco**, respectivamente.

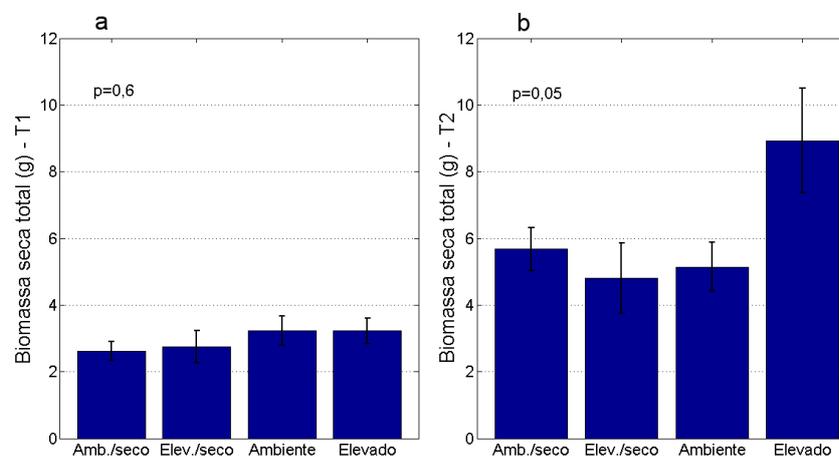


Figura 5.14 Biomassa seca total, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; a. T1 – medidas com 38 dias; b. T2 – medidas com 79 dias

Analisando a Taxa de Assimilação Líquida (TAL) (Figura 5.15a), observa-se que no tratamento **elevado**, a assimilação líquida foi mais alta do que nos

demais tratamentos: **ambiente**, **elev./seco**, **amb./seco**. É um resultado esperado, pois ao longo do experimento as plantas do tratamento elevado armazenam mais biomassa em função do tempo e da área foliar.

Analisando a Taxa de Crescimento Relativo (TCR) (Figura 5.15b), observa-se que a maior TCR foi durante o tratamento **elevado** em relação aos demais tratamentos: **ambiente**, **elev./seco** e **amb./seco**.

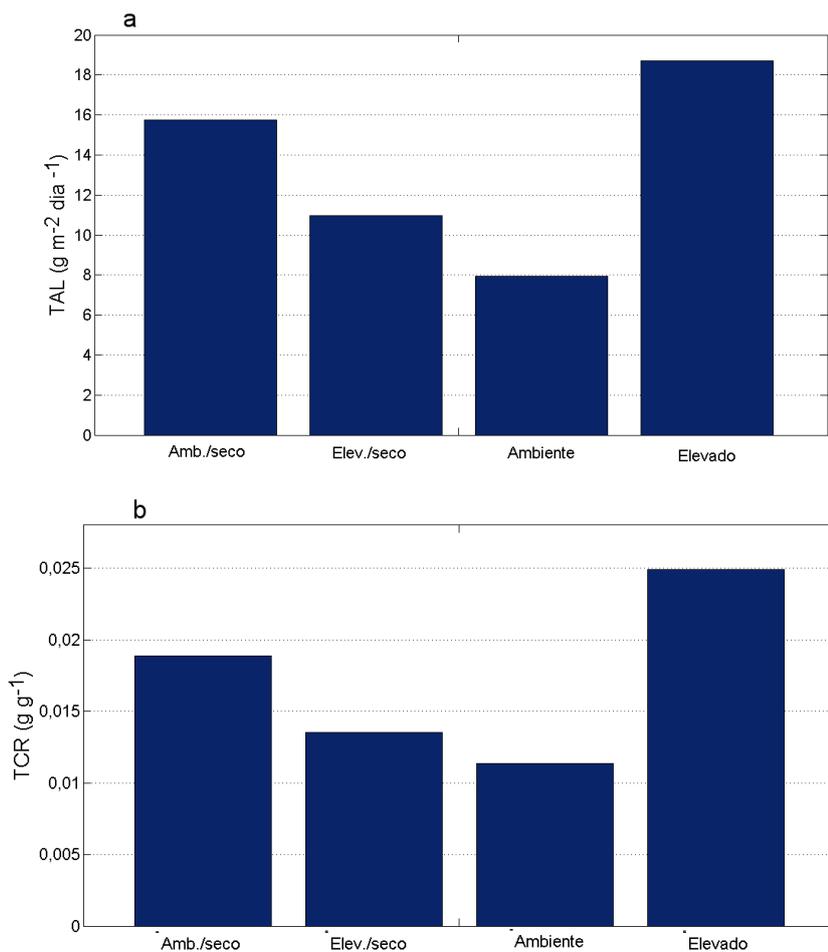


Figura 5.15 Taxa de Assimilação Líquida (TAL) e Taxa de Crescimento Relativo (TCR) para quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado, (n=5); a. Taxa de Assimilação Líquida (TAL); b. Taxa de Crescimento Relativo (TCR).

Quanto à fração de biomassa (Figura 5.16), observa-se que houve uma maior alocação de biomassa seca no caule em T1 e T2 para o tratamento **amb./seco** (Figura 5.16c e 5.16d). Também se observa uma maior alocação de biomassa

para a raiz nos tratamentos em que as plantas estiveram sob estresse hídrico: **amb./seco** e **elev./seco** (Figura 5.16e e 15.16f).

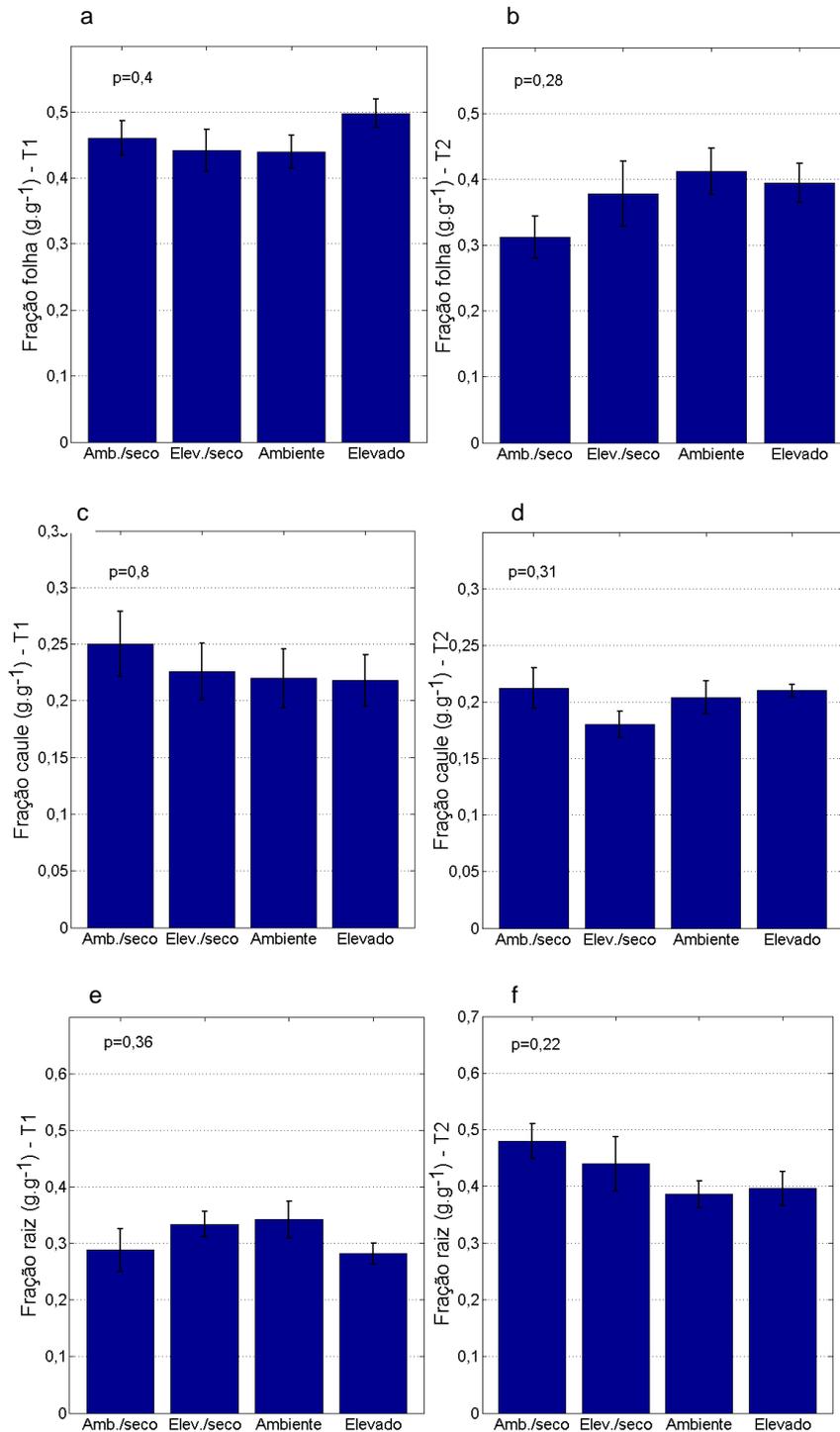


Figura 5.16 Fração de biomassa, erro padrão da média (n=5), (\*) diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os quatro tratamentos: amb./seco, elev./seco, ambiente e elevado; T1 – medidas com 38 dias, T2 – medidas com 79 dias: a. Fração de folha (T1); b. Fração de folha (T2); c. Fração de caule (T1); d. Fração de caule (T2); e. Fração de raiz (T1); f. Fração de raiz (T2)

### 5.3. Discussão

Basicamente, a aclimatação fotossintética sob elevada concentração de CO<sub>2</sub> ocorre devido à redução no investimento de recursos para a Rubisco e ao aumento do investimento em processos de suporte e regeneração de RuBP e fosfato inorgânico (Pi) (SAGE, 1994; GRANDIS, 2010). Observando-se os resultados de assimilação não foram constatados indícios de aclimatação durante o período do experimento (Figura 5.3). Apesar do pico observado em T1, e uma diminuição da taxa de assimilação em T2, indícios de aclimatação também teriam que ser observados em V<sub>cmax</sub> (Figura 5.5). Esta diminuição na assimilação fotossintética pode ser atribuída ao aumento da idade da planta e de acordo com a sua ontogenia (POORTER, POTHMANN, 1992; SUZUKI et al., 1987; GRANDIS, 2010). E a redução de V<sub>cmax</sub> observada em T2 para todos os tratamentos ocorreu provavelmente por estar diretamente correlacionada à assimilação. Resultado semelhante foi relatado por Grandis (2010) para a espécie amazônica *Senna reticulata* cultivada em alta concentração de CO<sub>2</sub>.

O aumento da EUA foi observado para três condições do experimento: **ambiente/seco**, **elevado/seco** e **elevado** (Figura 5.7). No caso do **ambiente/seco**, observa-se que em T1, com 38 dias de experimento, a EUA foi de 48,2 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O, e em T2, com 79 dias de experimento, maior período sem irrigação, a EUA aumentou para 89,8 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O mostrando o alto grau de adaptação desta espécie ao semiárido. Outra observação é a de que mesmo com a diminuição da taxa fotossintética com 79 dias de cultivo nos tratamentos com elevado CO<sub>2</sub> (**elevado/seco** e **elevado/ambiente**) a EUA ainda foi maior do que em T1, porque também houve redução da condutância estomática. Ainda sobre EUA, Ainsworth e Long (2005) observaram um aumento de até 50% na EUA do tratamento elevado em comparação a ambiente nos experimentos com FACE. Nas catingueiras cultivadas em OTCs no LAFIECO-USP, a EUA variou de 34 a 81%.

Em relação à condutância estomática, num trabalho de revisão com FACE, Ainsworth e Long (2005) apontaram uma redução na taxa de condutância

estomática de aproximadamente 20% para plantas cultivadas numa elevada concentração de CO<sub>2</sub>. Os resultados obtidos nas OTCs com a *P. microphylla* apresentam valores similares (Figura 5.6). Em T2, houve uma redução de 21% para o tratamento **elevado** em relação ao **ambiente**. E houve uma diminuição de 39,3 % para o tratamento **elev./seco** em relação ao **amb./seco**.

O tratamento de elevado fez efeito sobre o acúmulo de biomassa nas catingueiras após 79 dias de cultivo. Körner (1998) observou que plantas de crescimento rápido mostram mais rapidamente os efeitos do alto CO<sub>2</sub>, enquanto as plantas de estágios tardios de sucessão ecológica, respondem menos a esse estímulo principalmente no que se refere a acúmulo de biomassa (CLARK, 2004). A *P. microphylla*, tem diversas características de ser uma planta de sucessão ecológica tardia por ser decídua e de ambiente seco (BUDOWSKI, 1965; PAULA et al., 2004). Aos 79 dias foi observado o aumento de biomassa em folhas, caule, raiz e total associado ao aumento do CO<sub>2</sub> em comparação às plantas cultivadas em CO<sub>2</sub> ambiente (Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14). Em condição ambiente de CO<sub>2</sub>, o tratamento de seca promoveu tendência de aumento na biomassa de raiz em comparação ao tratamento irrigado (Figura 5.16f), o que pode ser atribuído à resposta desse órgão para aumentar a captação de água em condição de baixa disponibilidade hídrica (CHAVES, 2003).

Chaves (2003) também sugere como estratégia das plantas para diminuir a perda ou aumentar a captação d'água, a redução da área foliar, ou a redução do crescimento, e ainda a queda de folhas mais velhas. A redução da área foliar e redução de crescimento foram observadas no tratamento **ambiente/seco**. Porém sob o tratamento **elevado/seco** este mesmo ajuste não foi observado demonstrando que o aumento do CO<sub>2</sub> foi capaz de reverter parte dos efeitos da seca provavelmente por permitir menor tempo de abertura estomática para captação de CO<sub>2</sub> acarretando menor perda de água (OLIVEIRA, 2013) (Figura 5.8).

Número de folhas maior no tratamento **elevado** sugere que também se aplica a estratégia sugerida por Chaves (2003) em que o aumento de CO<sub>2</sub> contribui para mitigar efeitos de seca, como descrito no parágrafo anterior. No entanto, outro fator que também pode ter contribuído para haver um número maior de folhas no tratamento **elevado** em comparação ao **ambiente** (Figura 5.9), pode ter sido o processo fertilizador (SAGE, 2002; KÖRNER, 2006). Ao aumentar o CO<sub>2</sub> disponível, há redução da fotorrespiração, pelo aumento da razão entre CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, e com isso a assimilação é maior para as plantas crescidas em CO<sub>2</sub> elevado (SHARKEY, 1988; GRANDIS, 2010).

Os efeitos observados neste experimento como o ganho de biomassa, aumento da área foliar, maior número de folhas, aumento da EUA, redução da abertura estomática são amplamente relatados e documentados na literatura (referências citadas nos parágrafos acima). No entanto, praticamente ainda não existiam estudos semelhantes para o semiárido brasileiro com espécies da Caatinga, antes deste trabalho aqui relatado.

## 6. RESULTADOS: EXPERIMENTO DE CAMPO NA CAATINGA

### 6.1. Campanhas de 2013 e 2014 (Petrolina-PE)

No período que antecedeu a campanha (30 dias anteriores) registrou-se uma precipitação acumulada de 102 mm. Durante a Campanha de 2013 foram realizadas medidas do potencial hídrico das plantas (Tabela 6.1). Em torno das 6 horas da manhã, o potencial hídrico das plantas foi mais alto ( $\psi > -2,7$  MPa), do que as medidas realizadas em torno das 13 horas ( $\psi = < -3$  MPa). As plantas (1, 2, 3, 4 e 11) com maior potencial hídrico obtiveram valores mais altos de assimilação fotossintética.

Tabela 6.1 – Potencial hídrico ( $\psi$ ) e Assimilação líquida ( $A_n$ ) dos 11 indivíduos de *P. microphylla* em Petrolina-PE

PLANTA	$\Psi$ (MPa) (6 Fev. 2013) ~6:00 (LT)	$\psi$ (MPa) (6 Fev. 2013) ~13:00 (LT)	$A_n$ ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
1	-1,44	-3,30	14,3
2	-1,47	-3,02	10,4
3	-1,04	-3,00	13,4
4	-1,44	-3,20	9,8
5	-1,86	-3,10	4,6
6	-2,32	-3,20	2,8
7	-2,39	-4,10	2,4
8	-2,45	-3,02	6,7
9	-2,69	-4,10	3,1
10	-1,70	-3,20	4,6
11	-1,38	-3,22	9,5

Entre os dias 15 e 21 de fevereiro de 2014, foi registrada uma precipitação acumulada de 41,32 mm. Essa precipitação foi muito próxima ao período de campanha (22 a 26 de fevereiro de 2014) e ainda durante esse período registrou-se mais 2 mm. de precipitação (43,32 mm.). O solo apresentou boa umidade e as condições das plantas eram boas, apesar de ainda se ressentirem da seca de 2013. Segundo o Dr. Saulo de Tarso, era visível que houve uma alta mortandade de indivíduos da mata. No entanto, não ocorreu a

morte de nenhum dos indivíduos de catingueira demarcados em 2012 para o experimento.

## **6.2. Curvas AxCi**

Foram obtidas as curvas AxCi para a espécie *P. microphylla* nas campanhas de 2013 e 2014 (Tabela 6.2). Na campanha de 2013, foram obtidas 10 curvas de CO<sub>2</sub> e na campanha de 2014 o número foi de 27 curvas de CO<sub>2</sub> (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 Dados obtidos para indivíduos de *P. microphylla* para as campanhas de 2013 e 2014, em Petrolina-PE

ANO	DPV <sub>F</sub> (kPa)	SE (±)	Temp. Ar (°C)	SE (±)	PAR <sub>o</sub> ( $\mu\text{mol f\acute{o}tons}$ $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	SE (±)	Vc <sub>max</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	SE (±)	Vc <sub>max</sub> (25 <sup>o</sup> C) ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	SE (±)
2013	4,49720	0,34	38,5	0,80	701,6	8,3	37,7	12,4	13,0	7,5
2013	4,43847	0,33	38,4	0,78	1914,4	207,7	77,3	5,9	26,5	5,3
2013	4,02850	0,26	37,8	0,68	963	51,3	60,6	8,7	22,4	6,0
2013	3,27095	0,13	35	0,22	179,5	77,4	159,1	7,4	71,5	2,0
2013	3,46174	0,16	34	0,06	1304	107,4	34,2	13,0	14,6	7,3
2013	2,30124	0,02	31,6	0,33	652,9	0,3	101,5	1,9	60,1	0,1
2013	1,96733	0,07	30	0,59	647,3	0,5	65,3	7,9	44,2	2,4
2013	2,35285	0,01	32	0,26	524,2	20,7	135,8	3,6	77,1	2,9
2013	3,44329	0,16	35,8	0,35	408,7	39,7	40	12,0	16,9	6,9
2013	3,21498	0,12	35,2	0,26	243,3	66,9	143,9	4,9	64,7	0,9
2014	1,24668	0,19	32,4	0,19	184,9	76,5	226,3	18,5	123,2	10,5
2014	1,21799	0,19	33	0,10	316,6	54,8	160,2	7,6	83,3	3,9
2014	1,09090	0,21	32	0,26	632,7	2,9	167,8	8,9	98,5	6,4
2014	1,40622	0,16	32,6	0,16	197,6	74,4	187,6	12,1	101,2	6,9
2014	1,79958	0,10	35,1	0,24	854,7	33,5	226,4	18,5	96,1	6,0
2014	2,64427	0,03	38,5	0,80	1923,3	209,2	41,9	11,7	14,3	7,3
2014	2,42536	0,00	37	0,55	1533,7	145,1	203,1	14,7	72,9	2,2
2014	3,20736	0,12	38,3	0,77	796,5	23,9	144,4	5,0	46,9	2,0
2014	3,38247	0,15	39,3	0,93	1877,2	201,6	32,5	13,3	10,7	6,0
2014	2,97034	0,08	37,1	0,57	484,7	27,2	141,7	4,6	54,9	0,6
2014	2,97897	0,09	35,9	0,37	201,2	73,8	43,7	11,4	17,3	6,8
2014	3,17688	0,12	36,3	0,44	532,9	19,3	179,3	10,8	70,1	1,8
2014	1,17687	0,20	28,3	0,87	220,1	70,7	107,9	0,9	83,8	7,9
2014	1,38237	0,17	31,6	0,33	254,5	65,1	123,2	1,5	75,4	2,6
2014	1,76653	0,10	34,1	0,08	1014,6	59,8	128,5	2,4	59,2	0,0
2014	2,44282	0,00	37,6	0,65	1871,3	200,6	157,7	7,6	60,2	0,1
2014	1,92229	0,08	27,3	1,03	188,5	75,9	107,7	0,9	85,8	4,3
2014	2,05905	0,06	29,1	0,74	227	69,6	51,8	10,1	37,6	3,5
2014	1,83197	0,09	28,8	0,79	222,9	70,3	89,6	3,9	68,4	1,5
2014	1,85148	0,09	28,5	0,84	187,5	76,1	67,6	7,5	52,1	1,1
2014	1,87569	0,09	29,8	0,62	211,3	72,2	90,1	3,8	65,9	1,1
2014	1,89957	0,08	35,2	0,26	291,2	59,0	92,3	3,4	63,1	0,3
2014	2,07286	0,05	30,8	0,46	506,2	23,7	70,3	7,1	44,9	2,3

ANO	DPV <sub>F</sub> (kPa)	SE (±)	Temp. Ar (°C)	SE (±)	PAR <sub>o</sub> (μmol fótons m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	SE (±)	Vc <sub>max</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	SE (±)	Vc <sub>max</sub> (25 <sup>o</sup> C) (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	SE (±)
2014	2,05267	0,06	30,6	0,49	291,6	59,0	134,8	3,4	84,6	4,1
2014	2,20861	0,03	31,6	0,33	556,5	15,4	211	16,0	119,7	9,9
2014	2,32679	0,01	31,4	0,36	460,2	31,2	54,6	9,6	31,4	4,5
2014	2,44251	0,00	33,1	0,08	491,6	26,1	103	1,7	55,6	0,5

DPV<sub>F</sub> (Déficit de Pressão de Vapor ao nível da folha), SE (erro padrão da média), Temp. Ar (temperatura do ar), PAR<sub>o</sub> (radiação fotossinteticamente ativa), Vc<sub>max</sub> (velocidade máxima de carboxilação)

Os dados mostram uma boa correlação negativa (-0,78) entre assimilação fotossintética e  $DPV_F$  (déficit de pressão de vapor ao nível da folha), como mostra a Figura 6.1. Os resultados de campo demonstram que quando o  $DPV_F$  é baixo há uma maior assimilação de carbono.

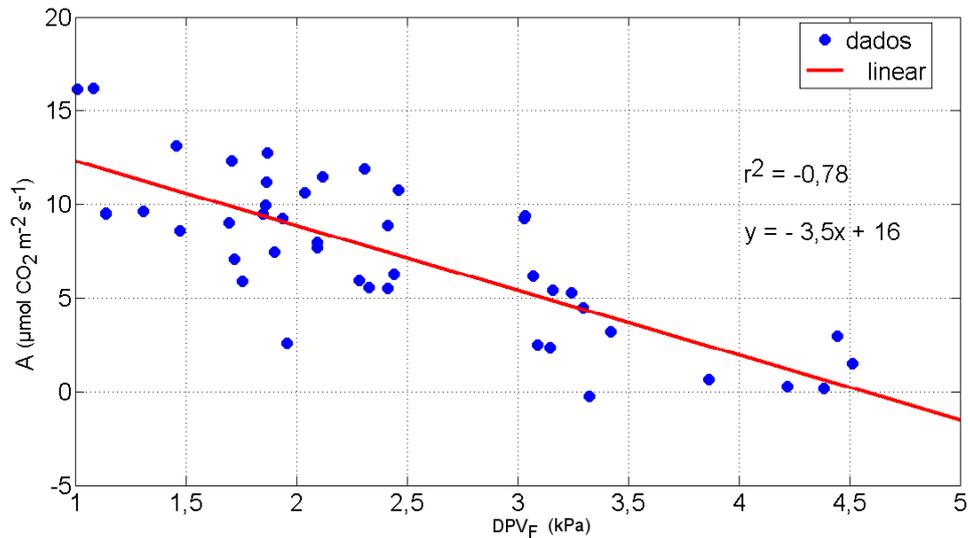


Figura 6.1 Dispersão do Déficit de Pressão de Vapor ao nível da Folha ( $DPV_F$ ) e assimilação de carbono (A) para as campanhas de 2013 e 2014 em Petrolina-PE, para a espécie *P. microphylla*

Na Figura 6.2 em 3D com os dados de  $V_{c_{max}}$ ,  $DPV_F$  e temperatura do ar, observa-se que para um  $DPV_F$  acima de 3 kPa, os valores de  $V_{c_{max}}$  são menores e estão na faixa de 30 a 90  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Os valores de  $V_{c_{max}}$  acima de 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ocorreram com a  $DPV_F$  abaixo de 3 kPa e com a temperatura acima de 32°C.

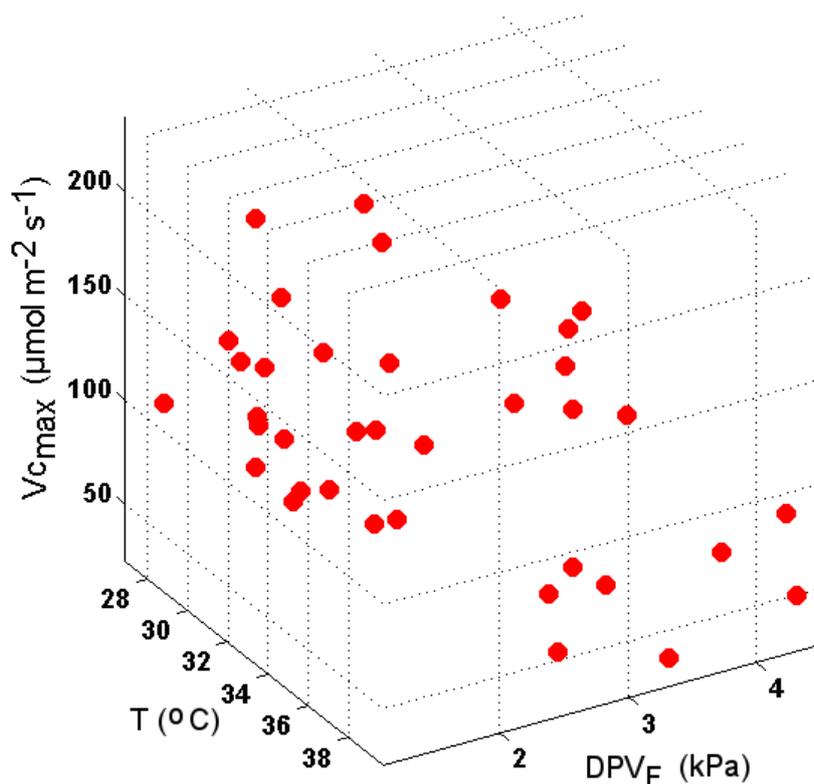


Figura 6.2 Dados de velocidade máxima de carboxilação ( $V_{c_{max}}$ ) para *P. microphylla*, temperatura do ar (T) e Déficit de Pressão de Vapor ao nível da Folha ( $DPV_F$ ) obtidos nas campanhas de 2013 e 2014 em Petrolina-PE

### 6.3. Discussão

Alguns valores de  $V_{c_{max}}$  obtidos nas campanhas foram considerados altos ao se comparar com árvores de biomas mais estudados no Brasil (GRANDIS; 2010). Os valores de  $V_{c_{max}}$  chegaram a atingir  $226 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Não foram encontradas na literatura medidas de  $V_{c_{max}}$  do semiárido brasileiro para fins de comparação. No entanto, para arbustos no semiárido de Mojave, nos Estados Unidos, Naumburg et al. (2003) encontraram valores de  $\sim 240 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  normalizados em  $25^{\circ}\text{C}$  (BERNACCHI et al., 2001). Ainsworth e Rogers (2007b) num experimento controlado obtiveram para arbustos um valor médio de  $V_{c_{max}}$  de  $116 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em  $25^{\circ}\text{C}$  e  $n = 22$ . Mission et al. (2006) obtiveram valores de  $V_{c_{max}}$  de  $\sim 140 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e uma média anual de  $96,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para o arbusto *Ceanothus cordulatus* Kellogg em Serra Nevada-EUA.

A boa anticorrelação (-0,78) entre assimilação (A) e  $DPV_F$  (Figura 6.1); e a observação de que a maior assimilação ocorreu com  $DPV_F < 3$  KPa e temperatura do ar  $> 32^{\circ}\text{C}$  demonstram que a escolha dessas variáveis independentes para inferir a  $V_{c_{\max}}$ , contribuem significativamente para o objetivo proposto.

Os dados de  $V_{c_{\max}}$  obtidos em laboratório não foram utilizados para ampliar a amostra obtida em campo com a finalidade de calibração do modelo, porque seria uma comparação de plântulas com árvores, e ainda, tem sido relatado que os resultados de experimentos controlados muitas vezes não concordam com medidas realizadas em campo (AINSWORTH; LONG, 2005). O valor médio de  $V_{c_{\max}}$  obtido em laboratório para o tratamento ambiente em T1 e T2 foi de  $55,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Tabela 5.1), e em campo foi de  $104,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Tabela 6.2).



## 7. RESULTADOS: APLICAÇÃO EM MODELAGEM DE SUPERFÍCIE

### 7.1. Resultados de modelagem

#### 7.1.1. Regressão Linear Múltipla

Através da Regressão Múltipla de medidas em campo tendo  $V_{c_{max}}$  como variável dependente foi obtida a equação

$$V_{c_{max}} = -109.7 - 38.3 DPV_F + 9.75 \text{ TempAr} - 0.03 \text{ PAR}_o \quad 7.1$$

Onde  $DPV_F$  é o Déficit de Pressão de Vapor estimado ao nível da folha, medida fornecida pelo equipamento utilizado (LICOR 6400);  $\text{TempAr}$  é a temperatura do ar e  $\text{PAR}_o$  é a radiação fotossinteticamente ativa medida fora da câmara do LICOR 6400. A variável independente  $DPV_F$  é a que tem o coeficiente mais expressivo (-38,3), portanto maior significância na regressão; seguida da temperatura do ar (9,75); e  $\text{PAR}_o$  com um coeficiente menos expressivo (-0,03). A equação foi implementada no código do INLAND, no módulo **inland\_stomataib**. Aplicando a equação, esses valores são ajustados como mostra a Figura 7.1.

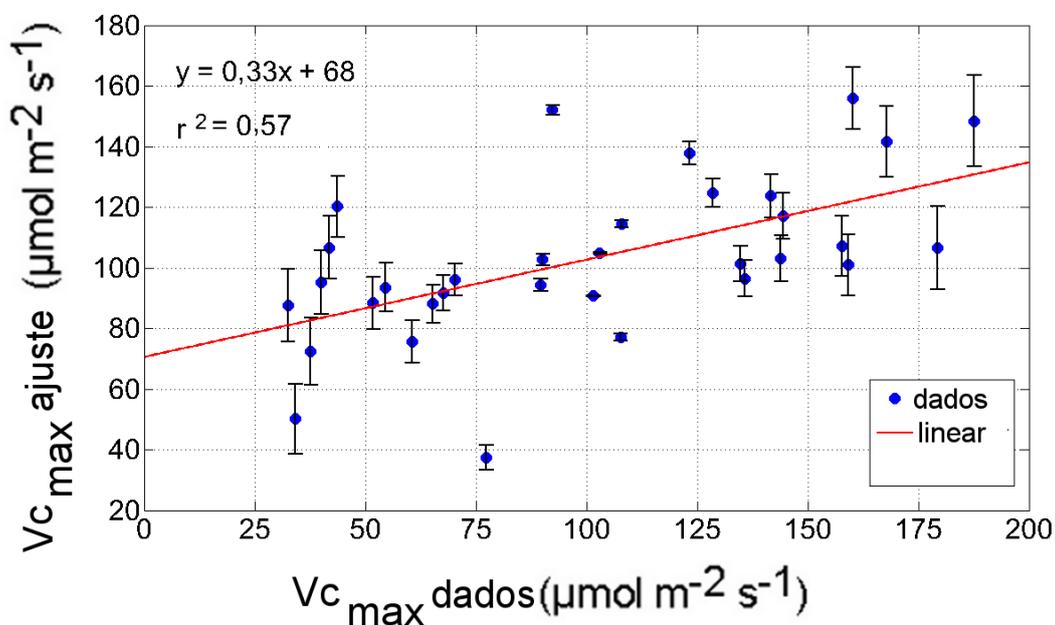


Figura 7.1 - Dispersão da  $V_{c_{max}}$  para *P. microphylla* obtida nas campanhas de 2013 e 2014 em Petrolina-PE e ajuste de  $V_{c_{max}}$  através Regressão Linear Múltipla (MLR)

### 7.1.2. Classification And Regression Tree (CART)

Os dados da Tabela 6.2 (com exceção das colunas: ano,  $V_{C_{max}}$  25°C e os erros médios) da seção anterior foram aplicados numa árvore de classificação do tipo CART (BREIMAN, et al., 1984; BREIMAN, 1994), tendo como nó-raiz (atributo a ser classificado), a  $V_{C_{max}}$ . Os resultados dessa classificação são mostrados na Figura 7.2, em vermelho, os valores de  $V_{C_{max}}$  que são médias calculadas seguindo as decisões entre os demais atributos:  $DPV_F$  e temperatura do ar. O atributo  $PAR_o$  teve pequena significância e foi irrelevante nesta classificação.

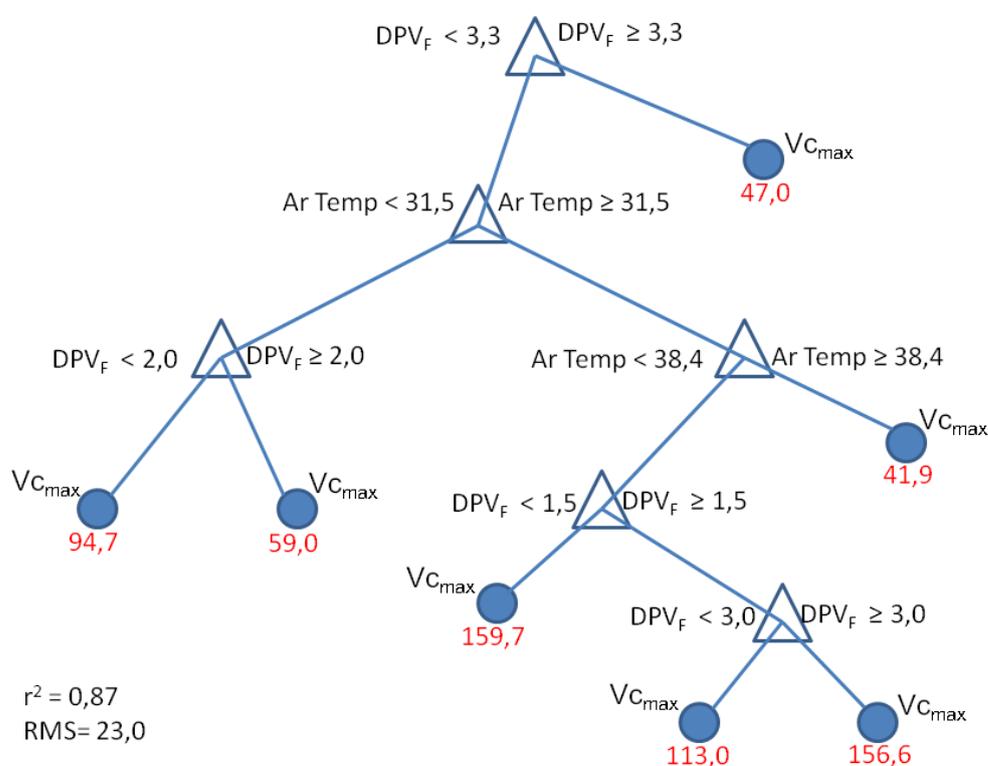


Figura 7.2 Árvore de classificação da  $V_{C_{max}}$  pelo algoritmo CART para inferir valores médios de  $V_{C_{max}}$  (em vermelho) de acordo com as variáveis independentes Déficit de Pressão de Vapor ao nível da Folha ( $DPV_F$ ) e temperatura do ar (Ar Temp)

As regras inferidas pelo CART (Figura 7.2) foram implementadas no código-fonte do modelo INLAND e ao ser executado o modelo, observa-se que as folhas 2 e 1 (classificações) foram as que obtiveram maior número de ocorrências (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 Porcentagem de ocorrências para cada classe (folha) de  $V_{c_{max}}$  utilizando a calibração pelo CART

	Folha 1	Folha 2	Folha 3	Folha 4	Folha 5	Folha 6	Folha 7
Ocorrências	4165	17361	0	27	1606	0	0
%	17,9	74,9	0	0,11	6,9	0	0
$V_{c_{max}}$	47,0	94,7	59,0	159,7	41,9	113,0	156,6

Folha é a classificação final de  $V_{c_{max}}$

### 7.1.3. K-MEANS

Após o cálculo da distância euclidiana entre os atributos (conforme descrito no Capítulo 4 – Materiais e Métodos) foram calculados os centroides para cada um desses atributos, de cada grupo como mostra a Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Centroides de cada atributo obtidos com o algoritmo K-MEANS

Atributo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
DPV <sub>F</sub>	0,1881	0,5743	0,3117	0,7393	0,1524
Temp. ar	0,1033	0,7736	0,3583	0,8312	0,4143
$V_{c_{max}}$	92,5	154,3	76,9	45,9	148,2

Após implementar esse cálculo de distância euclidiana no código do INLAND, o modelo foi executado tendo como forçantes os dados de 2011 das torres micrometeorológicas. Foi obtida a classificação mostrada na Tabela 7.3. Pode ser observado que o Grupo 1 foi o que obteve uma maior classificação (70,9 %) em que o  $V_{c_{max}}$  é de  $92,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . O Grupo 4 teve a segunda classificação (14,6 %) com um  $V_{c_{max}}$  de  $45,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Tabela 7.3 Resultados de classificação de  $V_{c_{max}}$  através de K-MEANS

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
Ocorrências	18179	882	2478	3755	338
%	70,9	3,4	9,6	14,6	1,3
$V_{c_{max}}$	92,5	154,3	76,9	45,9	148,2

Observa-se que as maiores classificações para os métodos CART e K-MEANS (74,9 % e 70,9%, respectivamente) os valores de  $V_{c_{max}}$  também foram próximos  $94,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e  $92,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente. Assim como a

segunda classificação em número de ocorrências para ambos os métodos: CART e K-MEANS foram para valores de próximos de  $V_{C_{max}}$  (47,0 e 45,9  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), respectivamente.

A Figura 7.3 teve o objetivo de contabilizar/mostrar o que modelo assumiu em cada uma das abordagens (CART, K-MEANS, MLR e NÃO CALIBRADA) como assimilação fotossintética, sendo que a limitante é dada pela equação:  $A = \min(\mathbf{Ac}, \mathbf{Aj}, \mathbf{At})$ , sendo que  $\mathbf{Ac}$  é limitante pela carboxilação,  $\mathbf{Aj}$  é limitante pelo transporte de elétrons e  $\mathbf{At}$  limitante pela triose fosfato. Observa-se que houve um maior número de casos em que a assimilação teve como limitante a carboxilação ( $\mathbf{Ac}$ ) o que reforça a importância da calibração de  $\mathbf{V}_{C_{max}}$  que teve preponderante importância nos resultados.

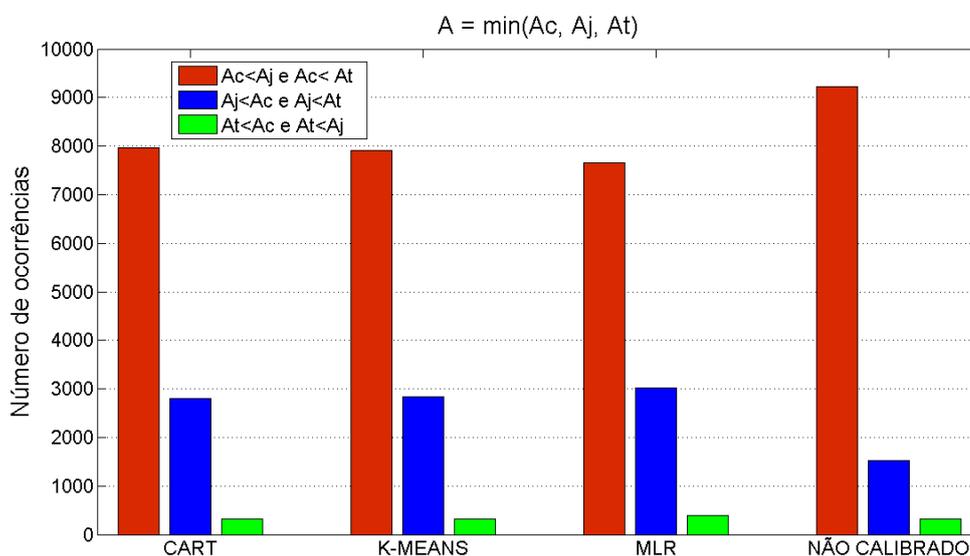


Figura 7.3 Histograma que mostra o número de vezes em que o modelo assumiu assimilação por limitação da carboxilação ( $\mathbf{Ac}$ ), assimilação por limitação no transporte de elétrons ( $\mathbf{Aj}$ ) ou assimilação por limitação de triose fosfato ( $\mathbf{At}$ )

#### 7.1.4. Produtividade Primária Bruta (PPB) e Troca Líquida do Ecosistema (TLE) – resolução mensal

Foram calculados os totais mensais de Produtividade Primária Bruta (PPB) e Troca Líquida do Ecosistema dos dados de saída do INLAND para as abordagens tratadas neste trabalho (Figura 7.4a). Observou-se que no pico da

produtividade (abril de 2011) as três abordagens (MLR, K-MEANS e CART) apresentaram valores de PPB: ~ 3100, ~ 3000 e ~ 3000  $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, quando a PPB observada (dados obtidos na torre de Petrolina, como descrito na Seção 4.2.4) foi de ~ 4800  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . No entanto pela abordagem de  $V_{C_{\text{max}}}$  NÃO CALIBRADO, observa-se que a simulação de PPB foi baixa (~ 2000  $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) em comparação com a PPB observada. Nos meses de julho até outubro (durante a seca), a PPB dos métodos CART, K-MEANS e NÃO CALIBRADO atingiram valores baixos, mas nenhum deles atingiu o valor de 0  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Nos meses de novembro e dezembro, três abordagens (CART, K-MEANS e MLR) concordaram com os dados observados (produtividade: ~ 1800  $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Pelo método de  $V_{C_{\text{max}}}$  NÃO CALIBRADO a produtividade ficou em ~ 1100  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Na resolução mensal houve uma boa correlação entre as abordagens e os dados de PPB observadas: CART ( $r^2$ : 0,93), NÃO CALIBRADO ( $r^2$ : 0,93), K-MEANS ( $r^2$ : 0,94) e MLR ( $r^2$ : 0,94).

A Figura 7.4b mostra que os totais mensais de TLE para CART, K-MEANS e MLR atingiram valores negativos nos meses de março a maio de 2011, quando os dados observados foram negativos no período janeiro a maio de 2011. Os valores negativos extremos para abordagens CART, K-MEANS e MLR foram em maio: -695, -720, -844  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Pela abordagem de  $V_{C_{\text{max}}}$  NÃO CALIBRADO, a produtividade foi negativa apenas em maio (-136  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), enquanto pelos dados observados o pico negativo ocorreu em abril (~ -2000  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e em maio atingiu ~ -1270  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Na análise de correlação de TLE dos totais mensais, a abordagem NÃO CALIBRADO teve baixa correlação e CART, K-MEANS e MLR tiveram boa correlação com dados observados de PPB: CART ( $r^2$ : 0,73), NÃO CALIBRADO ( $r^2$ : 0,27), K-MEANS ( $r^2$ : 0,77) e MLR ( $r^2$ : 0,82). Observa-se que PPB tem alta correlação com a precipitação e TLE tem anticorrelação com a precipitação.

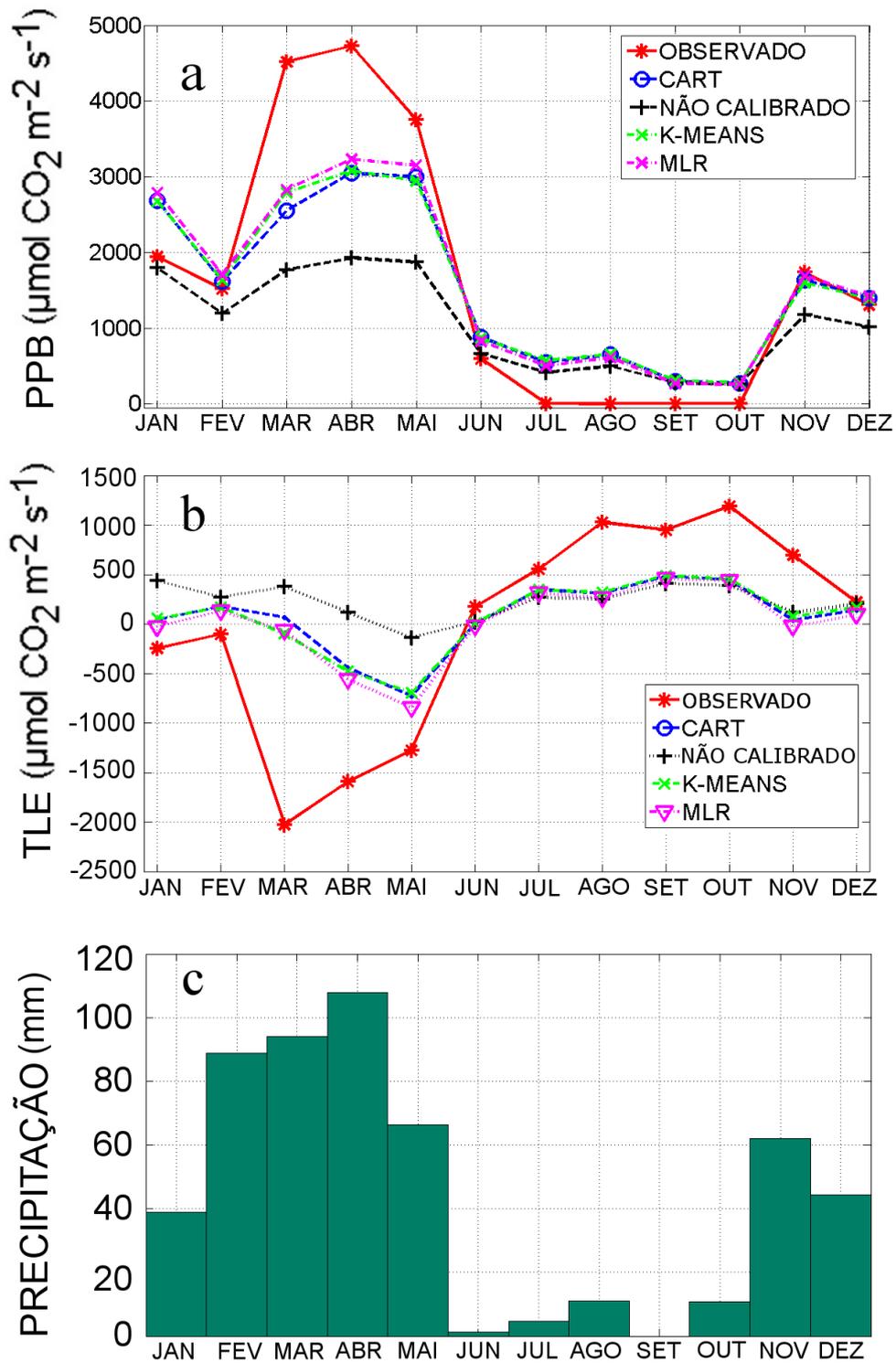


Figura 7.4 Totais de Produtividade Primária Bruta (PPB) e Troca Líquida do Ecosistema (TLE) para o ano de 2011 em Petrolina-PE – comparações dos resultados dos quatro métodos (algoritmo CART, NÃO CALIBRADO no INLAND, algoritmo K-MEANS e regressão (MLR)) e dados observados. a. PPB; b. TLE; c. Precipitação.

### 7.1.5. Produtividade Primária Bruta (PPB) e Troca Líquida do Ecossistema (TLE) - resolução horária -

Os métodos aplicados para a calibração do  $V_{c_{max}}$  reproduziram razoavelmente bem a variabilidade da PPB comparando com a PPB observada (Figura 7.5) na resolução horária. No entanto, os resultados para o modelo NÃO CALIBRADO, a produtividade foi mais baixa do que nas demais abordagens (em torno de  $6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  no pico) quando PPB observado foi de cerca de  $25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  nos meses chuvosos (março-junho) (Figura 7.5d – Figura 7.5a). K-MEANS também teve um resultado bem razoável quando a produtividade foi em torno de  $24 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em alguns momentos no mês de maio (Figura 7.5a – 7.5e). Para os meses de novembro e dezembro, K-MEANS foi bem acurado e PPB alcançou dois picos com valores de  $\sim 19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em comparação com as observações de  $\sim 18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $24 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Outras abordagens (CART e MLR) também tiveram resultados razoáveis para os picos de novembro e dezembro. No modelo NÃO CALIBRADO teve dois picos de  $10 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura 7.5d) cujos valores são bem mais baixos do que as outras abordagens. As correlações entre PPB observadas e saídas do modelo ficaram entre 0,69 a 0,71 (Figura 7.6).

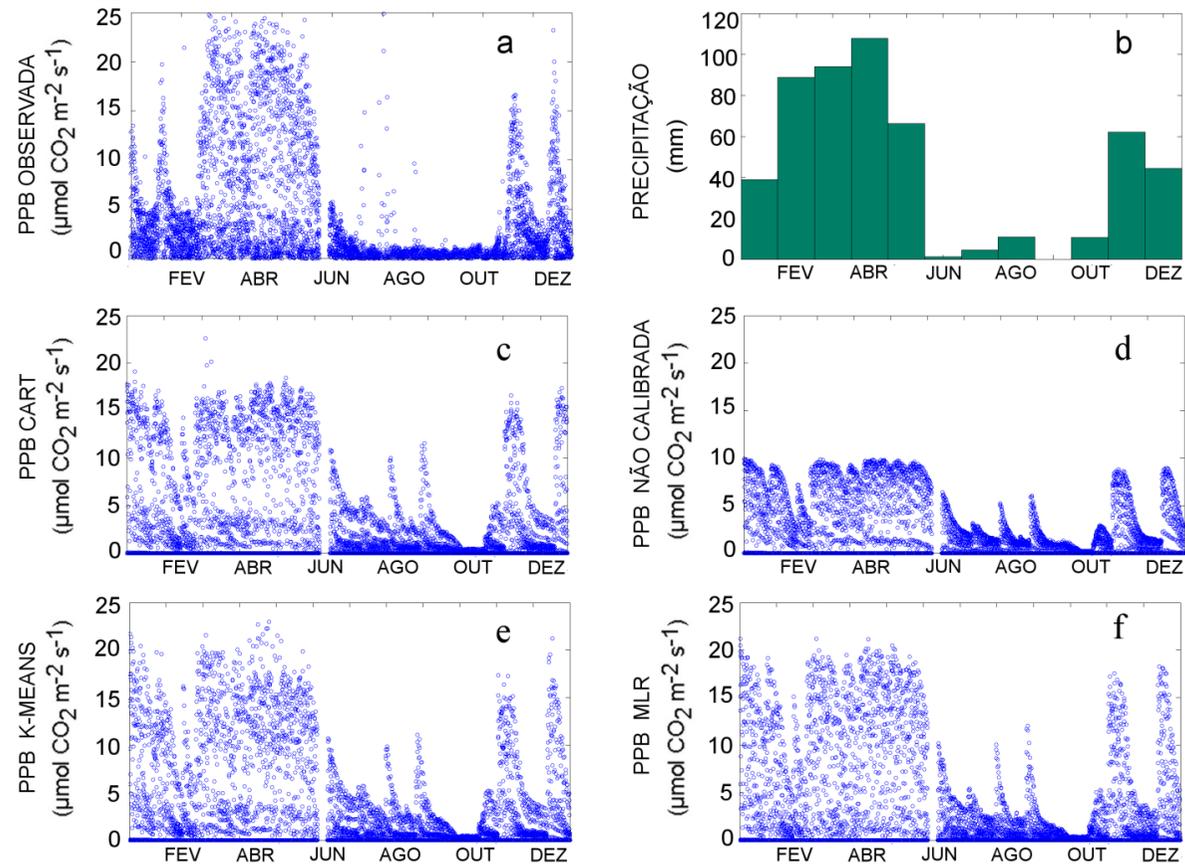


Figura 7.5 Comparação da Produtividade Primária Bruta (PPB) observada em Petrolina-2011 na resolução horária com os métodos aplicados — a) PPB observada; b) Precipitação; c) PPB obtida com o algoritmo CART; d) PPB não calibrado no INLAND; e) PPB obtida com o algoritmo K-MEANS; f) PPB obtida com a regressão (MLR)

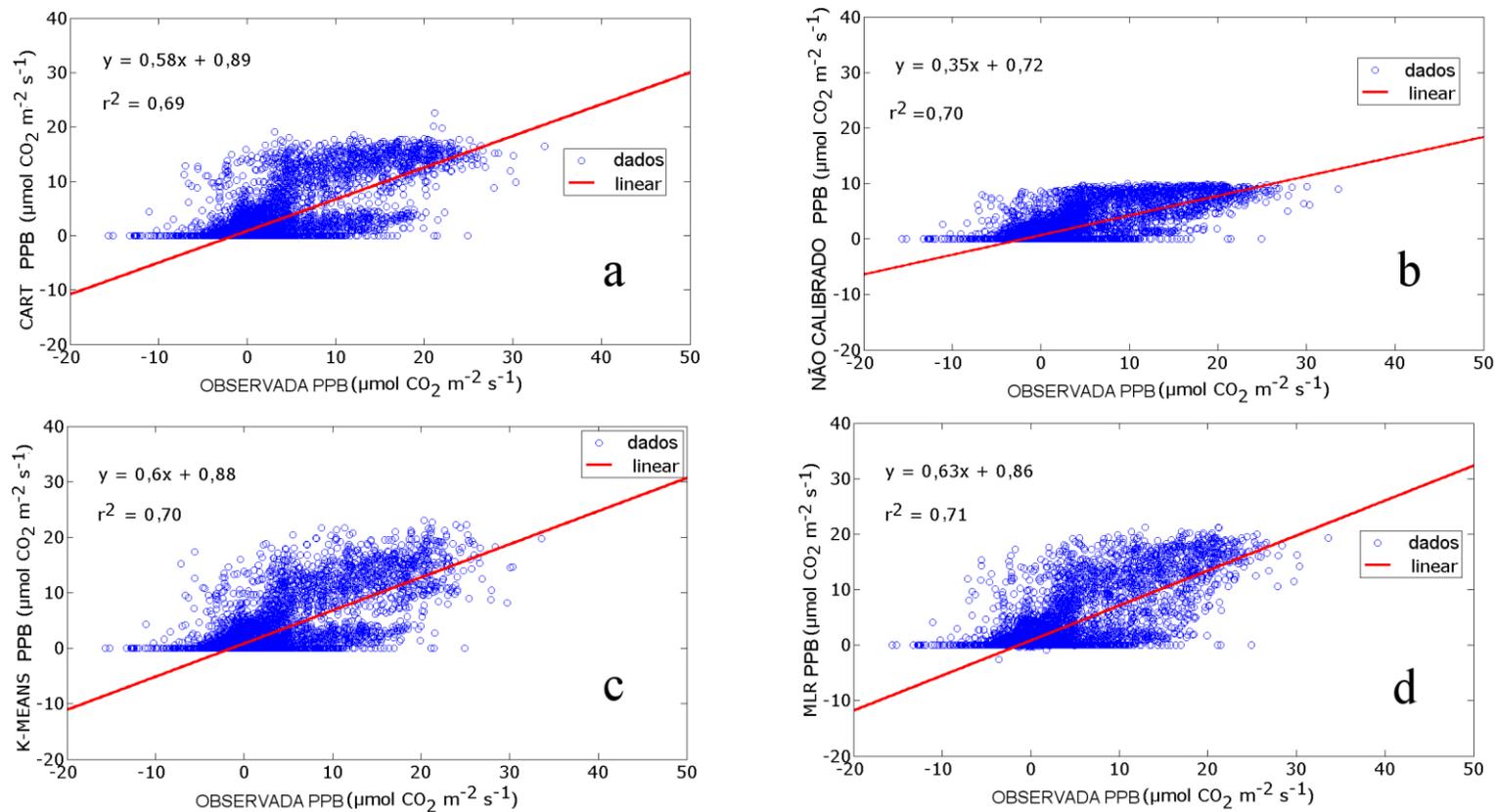


Figura 7.6 Dispersão da Produtividade Primária Bruta (PPB) observada e PPB (saída do INLAND) – a. PPB observada e PPB obtida com o algoritmo CART; b) PPB observada e não calibrado no INLAND; c. PPB observado e PPB K-MEANS; d. PPB observada e PPB obtida com a regressão(MLR)

Os métodos CART, NÃO CALIBRADO, K-MEANS e MLR reproduziram a variabilidade da TLE em comparação com TLE observado (Figura 7.7). Todos os métodos mostraram uma amplitude mais baixa do que a observada TLE. No entanto, no modelo NÃO CALIBRADO a amplitude foi menor ainda do que os dados observados ( $-5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) durante o período chuvoso (março-junho / 2011), enquanto que TLE observado foi em torno de  $-20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura 7.7a – 7.7c). O método K-MEANS mostrou resultados mais próximos aos dados observados tendo uma amplitude mais negativa do que os demais métodos (Figura 7.7a – 7.7f).

A melhor correlação (0,71) entre TLE observado e TLE do modelo foi para o método K-MEANS e a menor correlação (0,66) foi para o NÃO CALIBRADO (Figura 7.8)

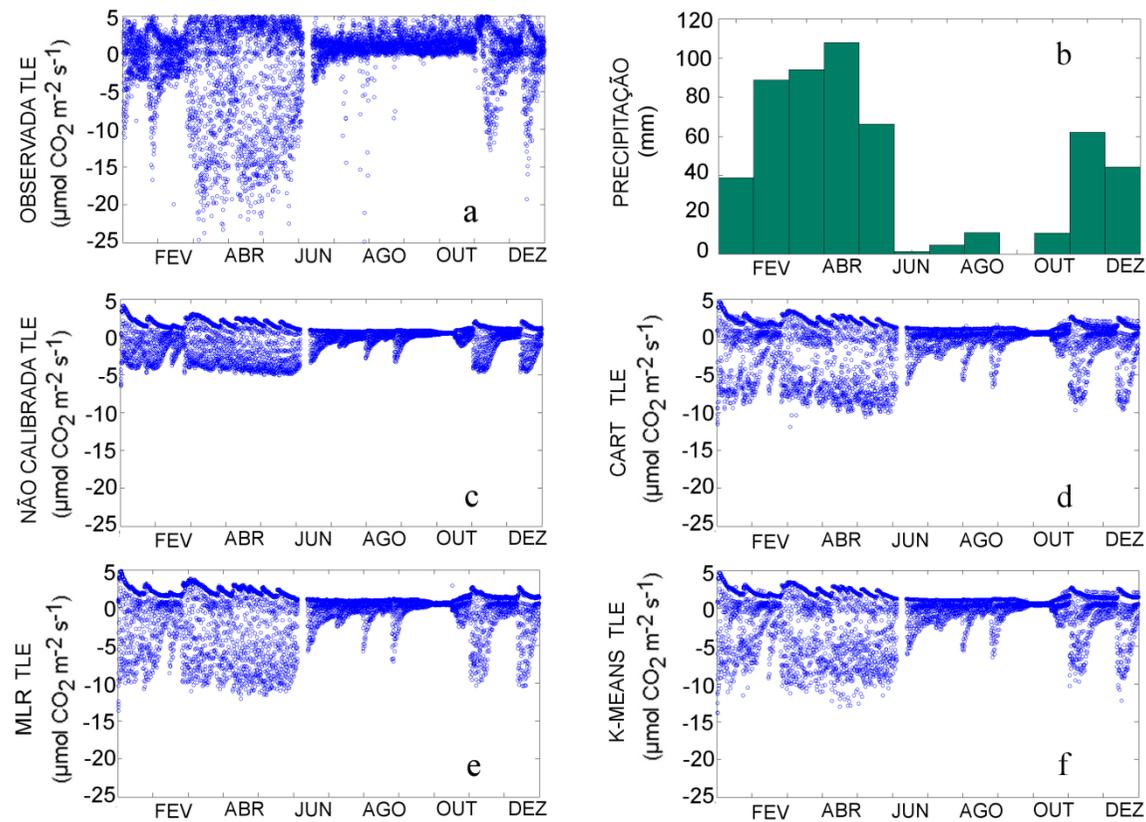


Figura 7.7 Troca Líquida do Ecosistema (TLE) - – Petrolina-PE 2011: a. TLE observada; b.Precipitação; c) TLE não calibrada no INLAND; d. TLE obtida com o algoritmo CART; e. TLE obtida com a regressão (MLR); f. TLE obtida com o algoritmo K-MEANS

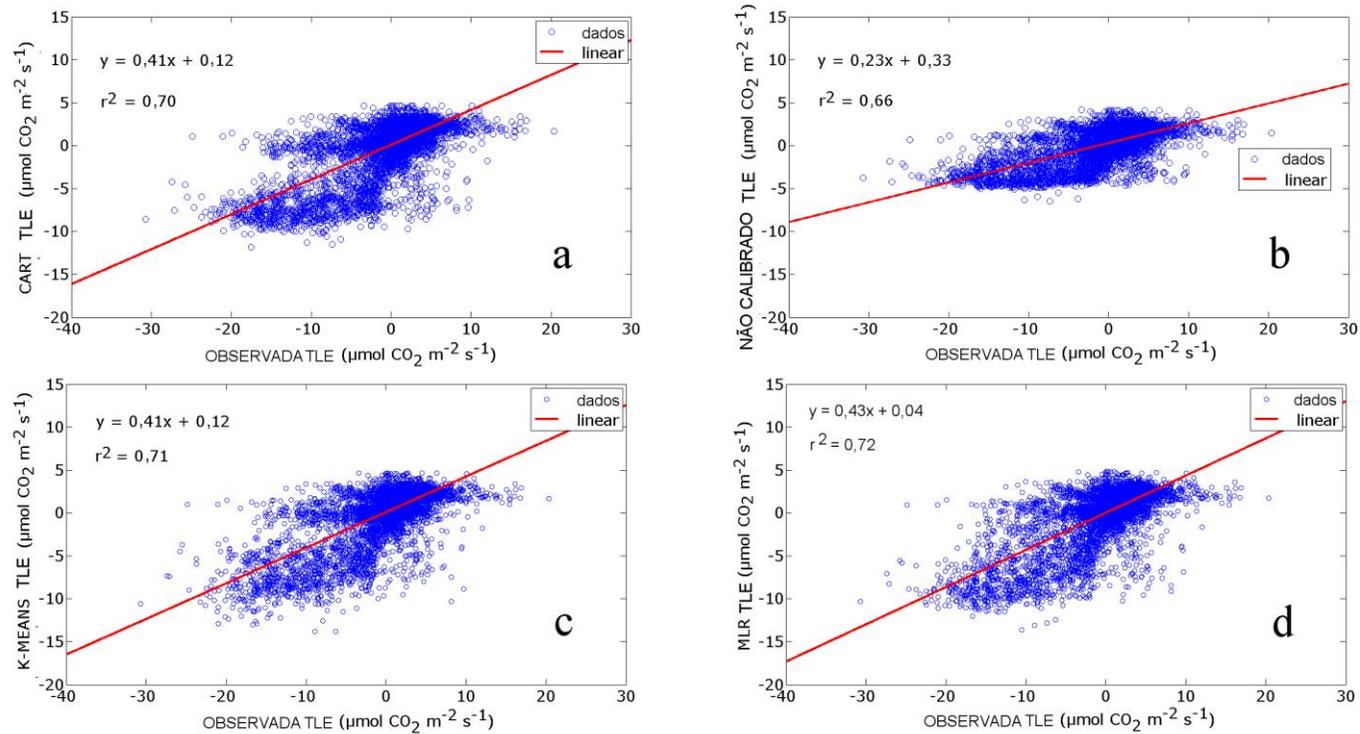


Figura 7.8 Dispersão para Troca Líquida do Ecossistema (TLE) observada e TLE (saídas do INLAND) em Petrolina-PE 2011 a) TLE observada x TLE obtida com o algoritmo CART; b) TLE observada x TLE modo não calibrado no INLAND; c) TLE observada x TLE obtida com o algoritmo K-MEANS; d) TLE observada x TLE obtida com a regressão (MLR)

### **7.1.6. Balanço de Energia (Rn), Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) - resolução horária**

No balanço de energia (Rn) a calibração da  $V_{C_{max}}$  não teve um efeito significativo ou seja, mesmo para  $V_{C_{max}}$  calibrada e  $V_{C_{max}}$  não calibrada, não houve uma significativa melhoria nos resultados ao se comparar o Rn observado com o Rn de saídas do modelo (Figura 7.9). Na análise de dispersão, todas as abordagens tiveram uma correlação alta ( $r^2 \geq 0,97$ ) entre os dados observados e as saídas do modelo (Figura 7.10).

Em relação ao calor sensível (H), todos os métodos subestimaram os valores de H para o intervalo de período de seca do dia 1 ao dia 60 e a partir do dia 180 até o dia 365 (Figura 7.11). Na análise de dispersão, todas as abordagens tiveram uma correlação alta ( $r^2 = 0,93$ ) entre os dados observados e as saídas do modelo (Figura 7.12).

Em relação ao calor latente (LE), as abordagens CART, K-MEANS e MLR conseguiram reproduzir o calor latente (LE) observado com razoável acerto. Apenas na abordagem Não Calibrada que o calor latente foi subestimado na estação das chuvas (entre os dias 80 e 150) ao se comparar com os dados observados (Figura 7.13). Na análise de dispersão para LE, a correlação entre os dados observados e as saídas do modelo foi entre 0,81 e 0,82 (Figura 7.14).

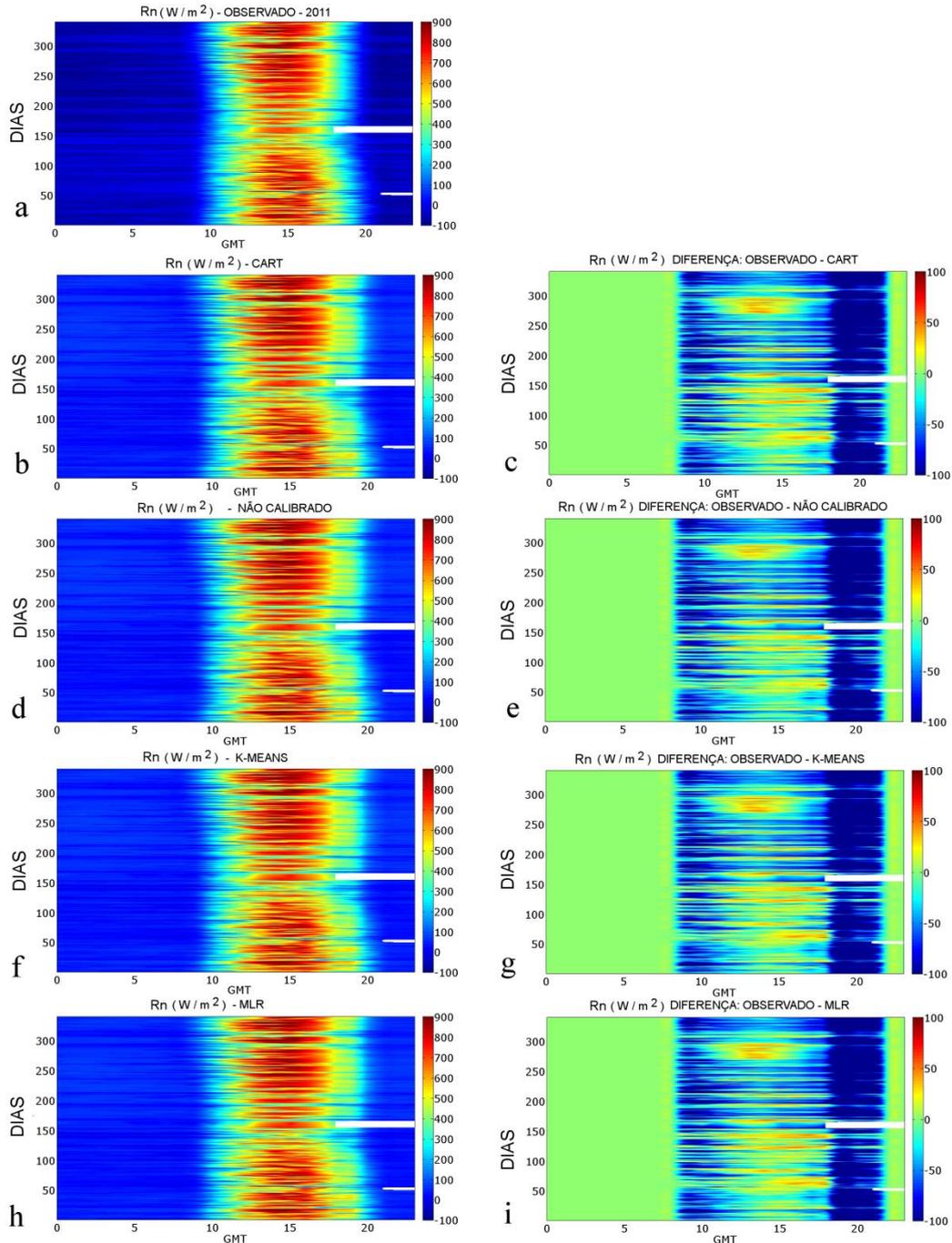


Figura 7.9 – Balanço de energia (Rn) Petrolina-PE 2011 - Comparação de balanço de energia (Rn) observado com as saídas do INLAND: a. Rn Observado; b. Rn obtido com o algoritmo CART, c. Diferença entre Rn observado e Rn obtido com o CART; d. Rn não calibrado; e. Diferença entre Rn observado e Rn não calibrado no INLAND; f. Rn obtido com o algoritmo K-MEANS, g. Diferença entre Rn observado e Rn obtido com o algoritmo K-MEANS; h. Rn obtido com a regressão (MLR); i. Diferença entre Rn observado e Rn obtido com a regressão (MLR)

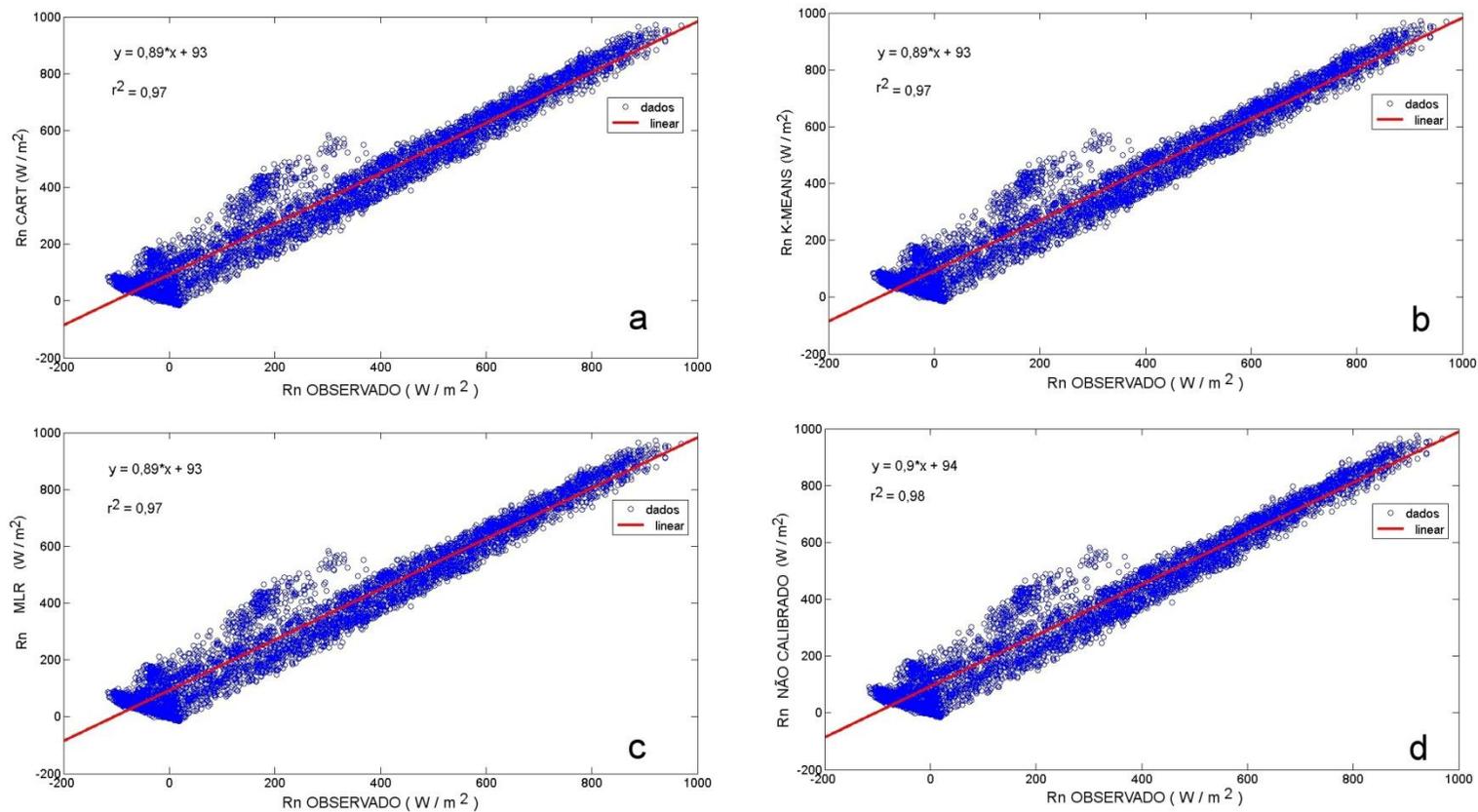


Figura 7.10 Dispersão para  $R_n$  observado e  $R_n$  (saídas do INLAND); a)  $R_n$  observado x  $R_n$  obtido com o CART; b.  $R_n$  observado x  $R_n$  obtido com o K-MEANS; c.  $R_n$  observado x  $R_n$  obtido com a regressão (MLR); d.  $R_n$  observado x  $R_n$  obtido no INLAND não calibrado

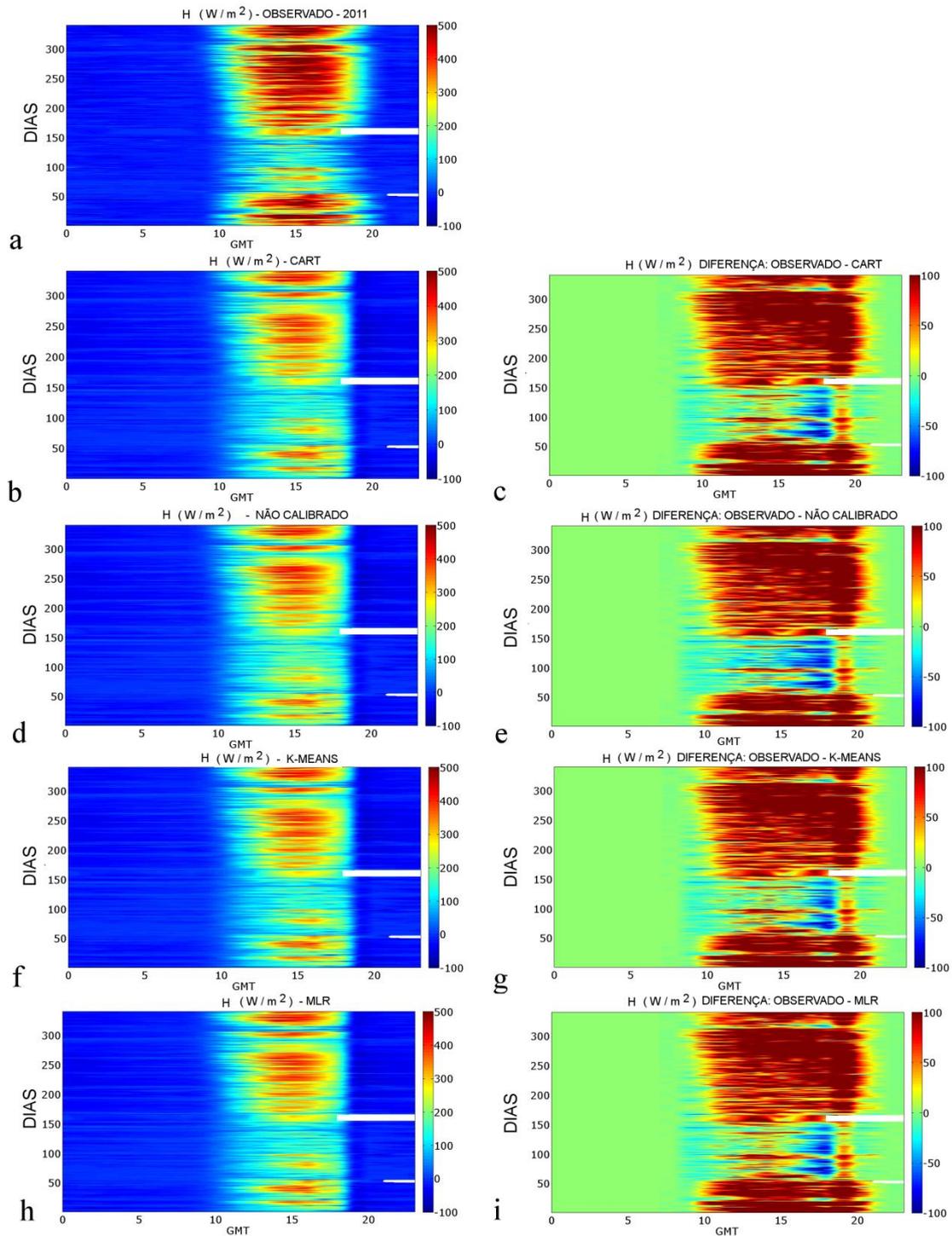


Figura 7.11 Calor sensível ( $H$ ) Petrolina-PE 2011 – a)  $H$  observado; b)  $H$  obtido pelo algoritmo CART; c) Diferença entre  $H$  observado e  $H$  CART; d)  $H$  não calibrado; e) Diferença entre  $H$  observado e  $H$  não calibrado; f)  $H$  obtido pelo algoritmo K-MEANS; g) Diferença entre  $H$  observado e  $H$  K-MEANS; h)  $H$  obtido pela regressão (MLR); i) Diferença entre  $H$  observado e  $H$  MLR

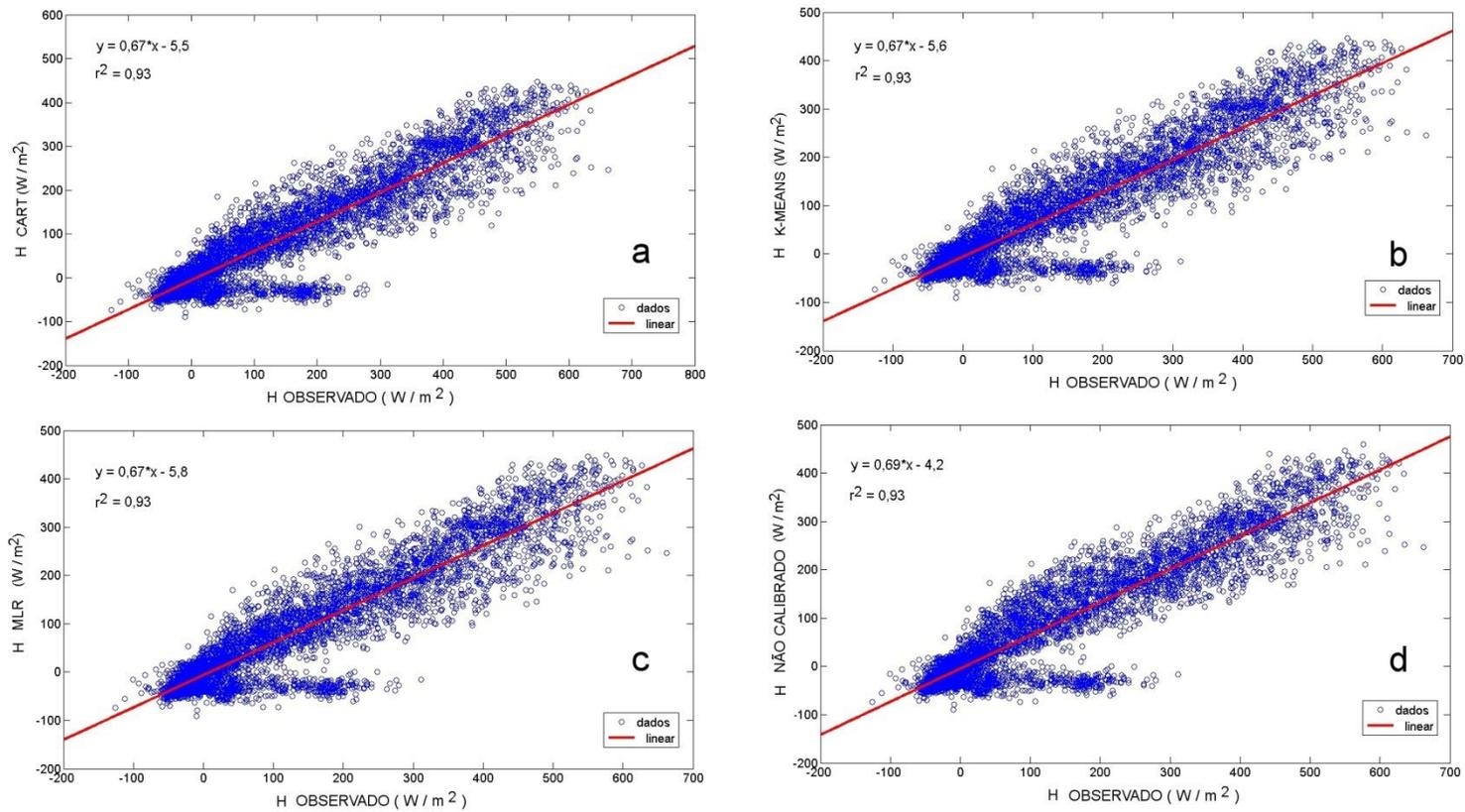


Figura 7.12 Dispersão para H observado e H (saídas do INLAND) Petrolina-PE 2011: a. H observado x H obtido pelo algoritmo CART; b. H observado x H obtido pelo algoritmo K-MEANS; c. H observado x H obtido pela regressão (MLR); d. H não calibrado no INLAND

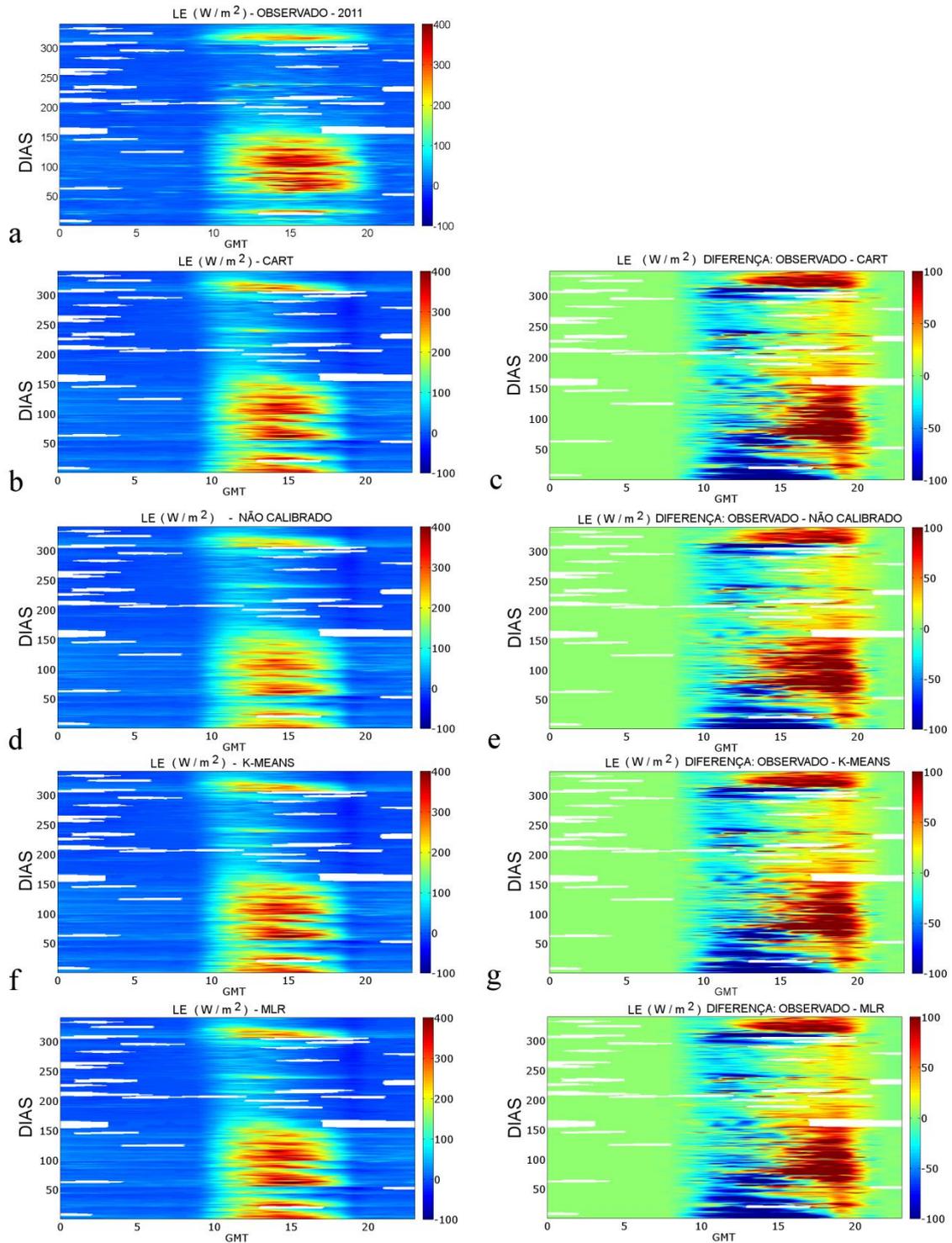


Figura 7.13 Calor latente (LE) Petrolina-PE 2011 – a) LE observado; b) LE obtido pelo algoritmo CART; c) Diferença entre LE observado e LE CART; d) LE não calibrado no INLAND; e) Diferença entre LE observado e LE não calibrado no INLAND; h) LE obtido com regressão (MLR); i) Diferença entre LE observado e LE obtido com a regressão (MLR)

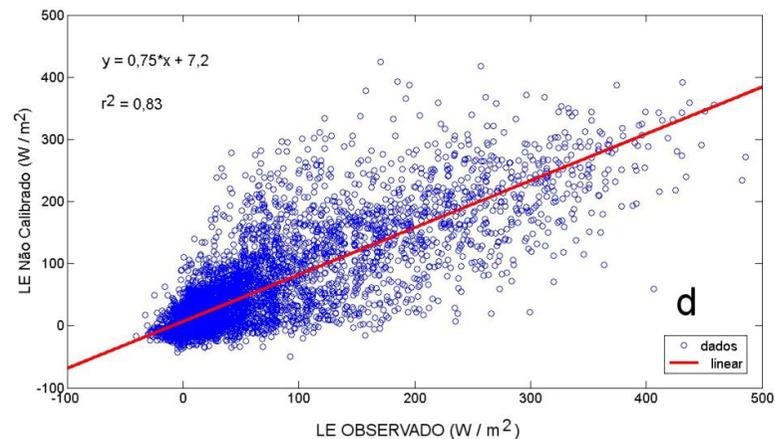
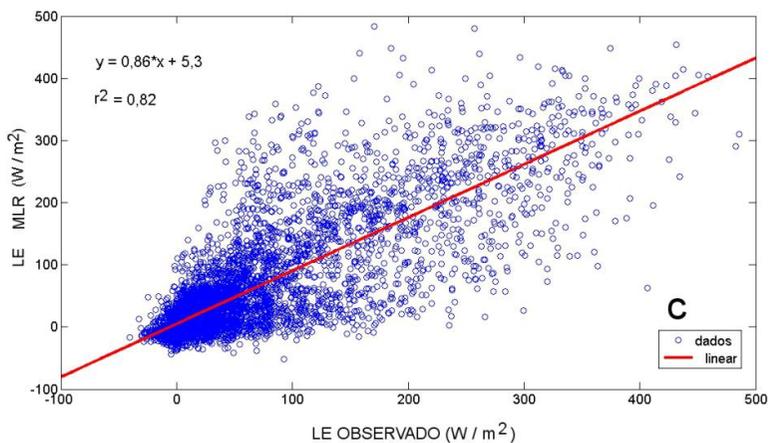
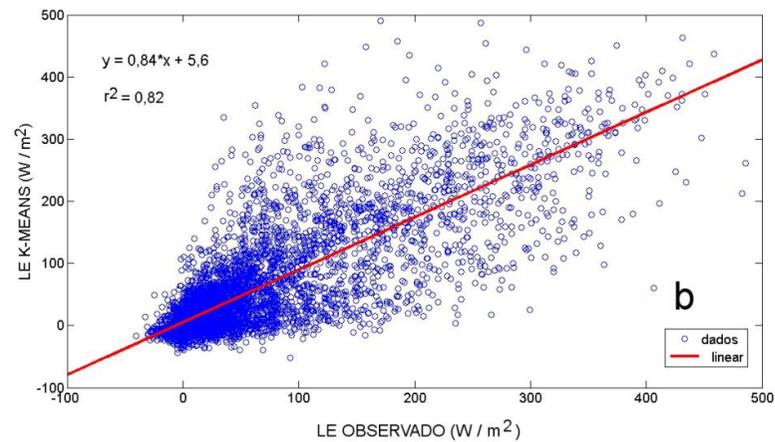
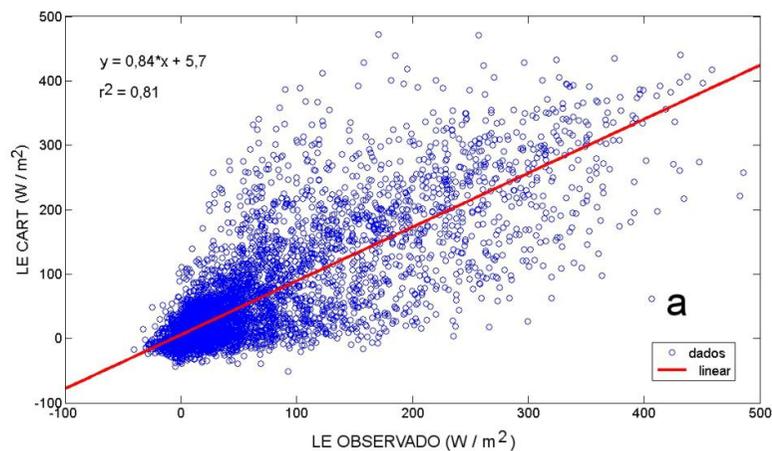


Figura 7.14 Dispersão para LE observado e LE (saídas do INLAND) Petrolina-PE 2011. a. LE observada x LE obtida pelo algoritmo CART; b. LE observada x LE obtida pelo algoritmo K-MEANS; c. LE observada x LE obtida pela regressão (MLR); d. LE observada x LE não calibrado no INLAND

### 7.1.7. Eficiência do Uso da Água (EUA)

A Eficiência do Uso da Água (EUA) (BEER et al., 2009) foi comparada com a média diária para os quatro métodos em relação à EUA observada (Tabela 7.4) para o período chuvoso de 1 de março a 31 de maio de 2011. A Regressão Linear Múltipla (MLR) (92%) foi a que mais se aproximou de EUA observada (100 %). E EUA do modelo NÃO CALIBRADO foi o valor mais baixo (68%) em comparação à EUA observada.

Tabela 7.4 Comparação de resultados para Eficiência do Uso da Água (EUA) – Petrolina-PE 2011 entre EUA observada e a EUA obtida com as saídas do modelo INLAND com os métodos aplicados (CART, K-MEANS, MLR e não calibrado)

MÉTODO	EUA (média diária) (g C Kg <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O)	%
CART	1,94	88,8
K-MEANS	1,97	90,1
MLR	2,03	92,7
NÃO CALIBRADO	1,49	68,0
OBSERVADO	2,19	100,0

Valores observados para o período de 1 de março a 31 de maio de 2011

### 7.1.8. Cenários

Na execução do modelo INLAND no modo grade (*grid* – 2D) com o objetivo de testar a sensibilidade do modelo calibrado ao CO<sub>2</sub> elevado, os resultados demonstram uma maior PPB em atmosferas mais ricas em CO<sub>2</sub> tanto para o sítio de Petrolina-PE (Figura 7.15) quanto para o Nordeste Brasileiro e estados vizinhos (Figura 7.16).

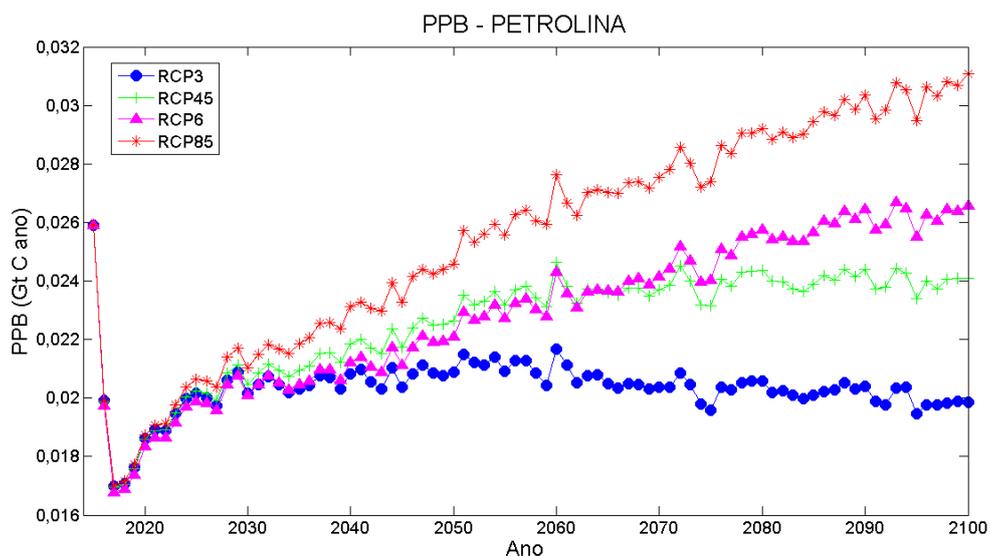


Figura 7.15 Cenário de Produtividade Primária Bruta (PPB) para Petrolina de 2016 a 2100 de acordo com o cenário de emissões para CO<sub>2</sub> (WAYNE, 2013)

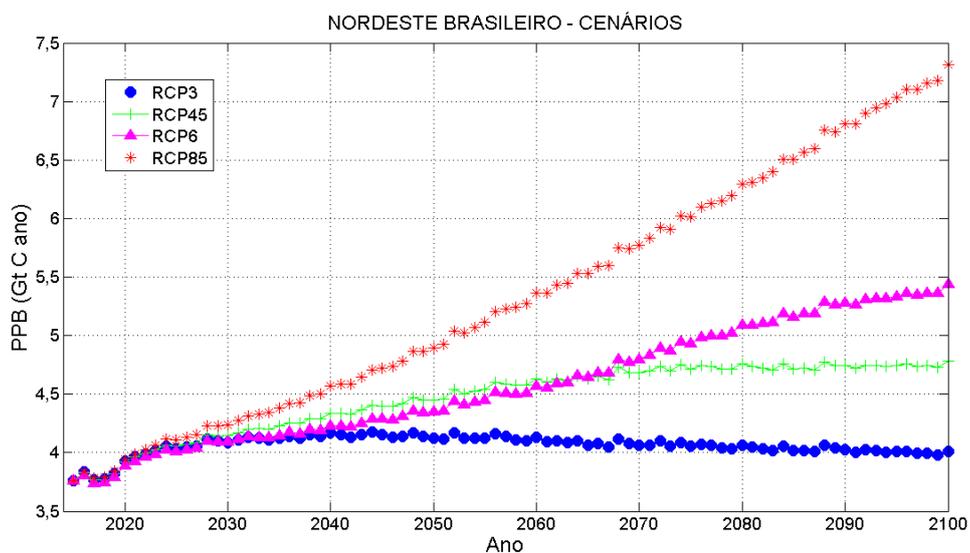


Figura 7.16 Cenário de Produtividade Primária Bruta (PPB) para o Nordeste brasileiro de 2016 a 2100 de acordo com o cenário de emissões para CO<sub>2</sub> (WAYNE, 2013)

Os resultados demonstram uma maior EUA em atmosferas mais ricas de CO<sub>2</sub> tanto para o sítio de Petrolina-PE (Figura 7.17) quanto para o Nordeste Brasileiro e estados vizinhos (Figura 7.18).

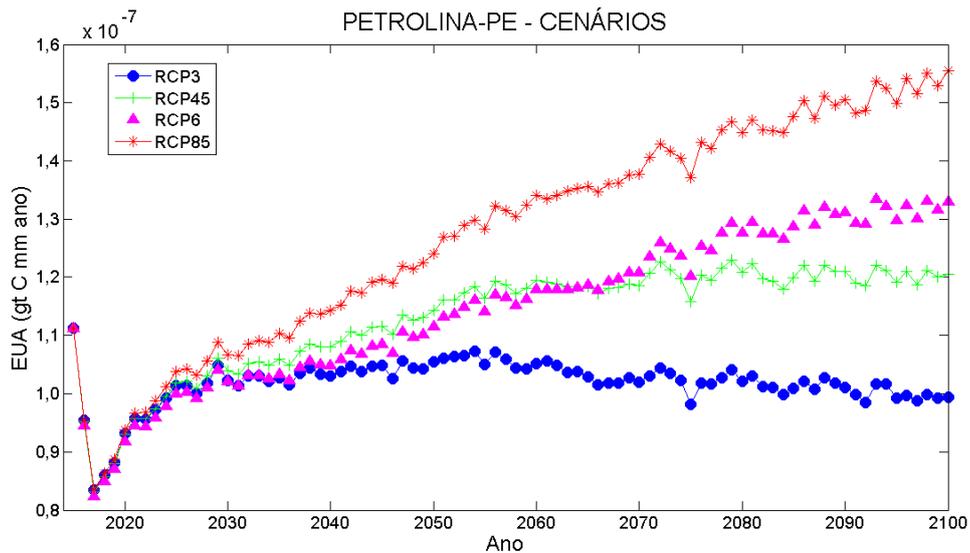


Figura 7.17 Cenário de Eficiência do Uso da Água (EUA) para Petrolina-PE de 2016 a 2100 de acordo com o cenário de emissões para CO<sub>2</sub> (WAYNE, 2013)

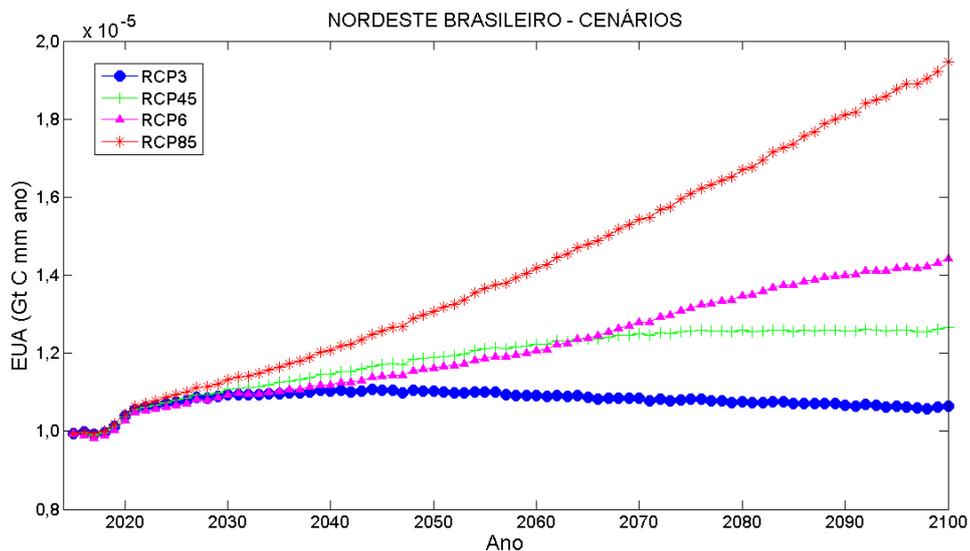


Figura 7.18 Cenário de Eficiência do Uso da Água (EUA) para o Nordeste brasileiro de 2016 a 2100 de acordo com o cenário de emissões para CO<sub>2</sub> (WAYNE, 2013)

A Figura 7.19 mostra a evolução da vegetação em Produção Primária Líquida (PPL) de 2015 a 2100 para os quatro cenários IPCC RCPs. A Figura 7.19 simula a provável fertilização da vegetação diante de uma maior concentração de CO<sub>2</sub>. Observa-se uma maior produção (~1,6 gt C ano) nos limites da Floresta Amazônica, no leste do estado do Pará e na Mata Atlântica. Na RCP 8.5 (Figura 7.10L), nesta simulação no ano de 2100 essa produção extrapolaria

esses limites e atingiria boa parte do norte do estado do Piauí e também expandiria na Mata Atlântica em direção ao interior do país.

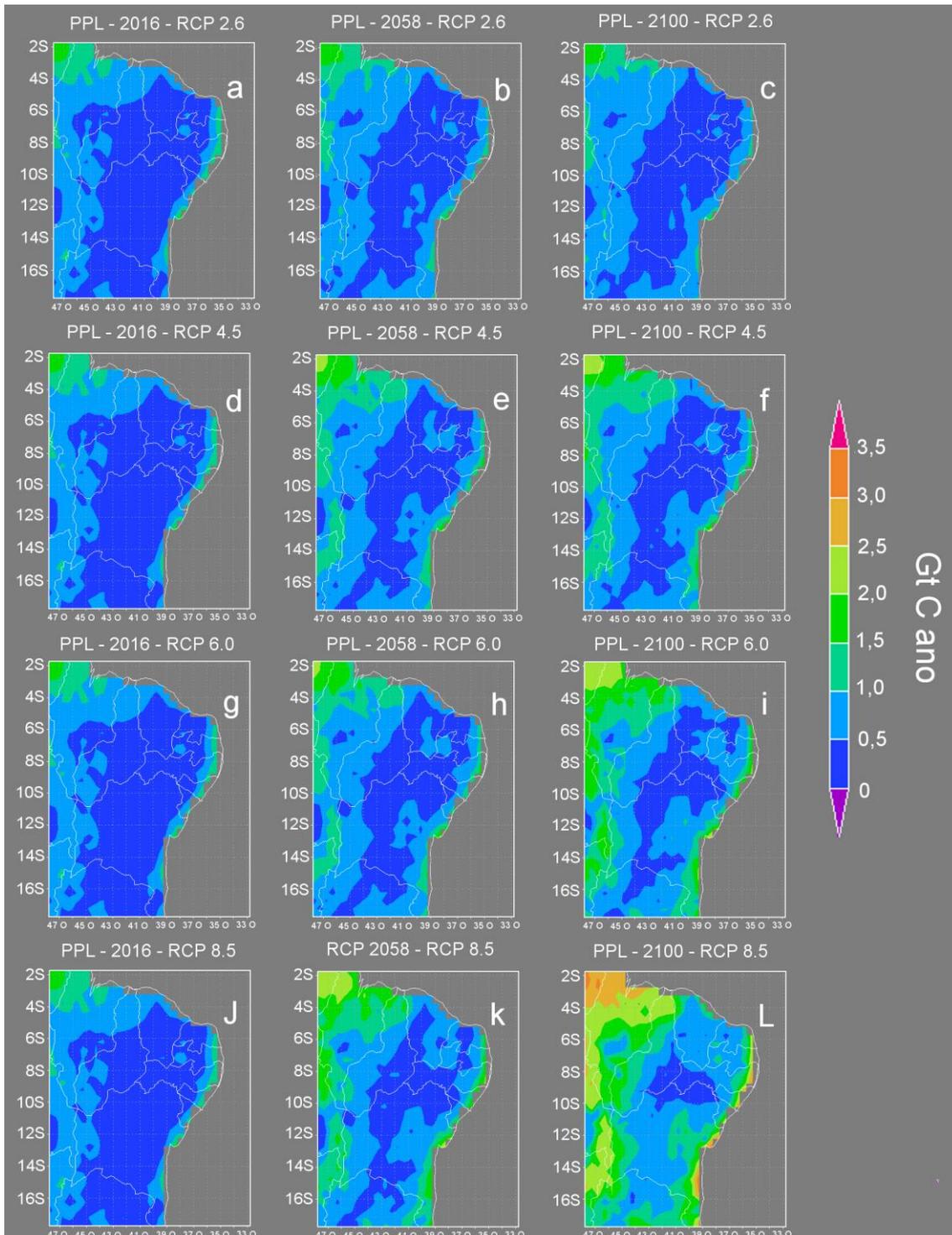


Figura 7.19 – Cenários de Produtividade Primária Líquida (PPL) (Gt C ano) do ano 2016 a 2100 de acordo com as RCPs 2.6, 4.5, 6 e 8.5 do IPCC(WAYNE, 2013): a) PPL 2016 RCP 2.6; b) PPL 2058 RCP 2.6; c) PPL 2100 RCP 2.6; d) PPL 2016 RCP 4.5; e) PPL 2058 RCP 4.5; f) PPL 2100 RCP 4.5; g) PPL 2016 RCP 6; h) PPL 2058 RCP 6; i) PPL 2100 RCP 6; J) PPL 2016 RCP 8.5; k) PPL 2058 RCP 8.5; L) PPL 2100 RCP 8.5

### 7.1.9. Discussão

Os métodos MLR CART e K-MEANS obtiveram resultados muito próximos entre si, além de terem se aproximado mais do OBSERVADO do que pelo modelo NÃO CALIBRADO. Como foi comentado em **Resultados**, nesta **Seção**, observa-se que as maiores classificações para os métodos CART e K-MEANS (74,9 % e 70,9%, respectivamente) os valores de  $V_{C_{max}}$  também foram próximos **94,5**  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e **92,5**  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente. E tendo como a segunda classificação em número de ocorrências para ambos os métodos: CART e K-MEANS foram também para valores próximos de  $V_{C_{max}}$  (47,0 e 45,9  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), respectivamente. Isto nos permite especular que valores razoáveis de  $V_{C_{max}}$  poderiam estar entre 92 a 95  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , em condições ambientais favoráveis como umidade no solo e  $DPV_F$  inferior a 3 KPa para o sítio do experimento. Em condições ambientais nem tão favoráveis, a  $V_{C_{max}}$  poderá estar na faixa de 45 a 47  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Uma observação suscitada por Bonan et al. (2012) a respeito de Modelos do Sistema Terrestre e DGVMs que têm um valor de  $V_{C_{max}}$  subestimado porque as medidas (e estimativas) são realizadas ao nível do dossel, e não ao nível da folha que tem um valor mais alto – não se confirma neste estudo de caso. O valor médio normalizado em 25<sup>0</sup>C (BERNACCHI et al., 2001) obtido de  $V_{C_{max}}$  para o TFP: **arbusto decíduo** no semiárido brasileiro (**59**  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) é muito próximo do valor obtido por Bonan et al. (2011) (**58**  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Os modelos IBIS (INLAND) e BETHY apresentam valores próximos para este mesmo TFP (**69**  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e **65**  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) (). Outros valores de  $V_{C_{max}}$  para modelos foram compilados por Rogers (2014) e também normalizados em 25<sup>0</sup>C (BERNACCHI et al., 2001) (Figura 7.20). Tomando as medidas de  $V_{C_{max}}$  observadas na Caatinga e dos modelos IBIS e INLAND como referências, outros modelos como BIOME-BGC e CLM, estariam com os seus valores de  $V_{C_{max}}$  subestimados. O que o trabalho mostrou é que não bastou uma simples média de  $V_{C_{max}}$  para representar a produtividade na Caatinga. As variáveis ambientais utilizadas como o  $DPV_F$  e a temperatura do ar, contribuíram para

representar a dinâmica da produtividade e alcançaram uma representação mais próxima do observado.

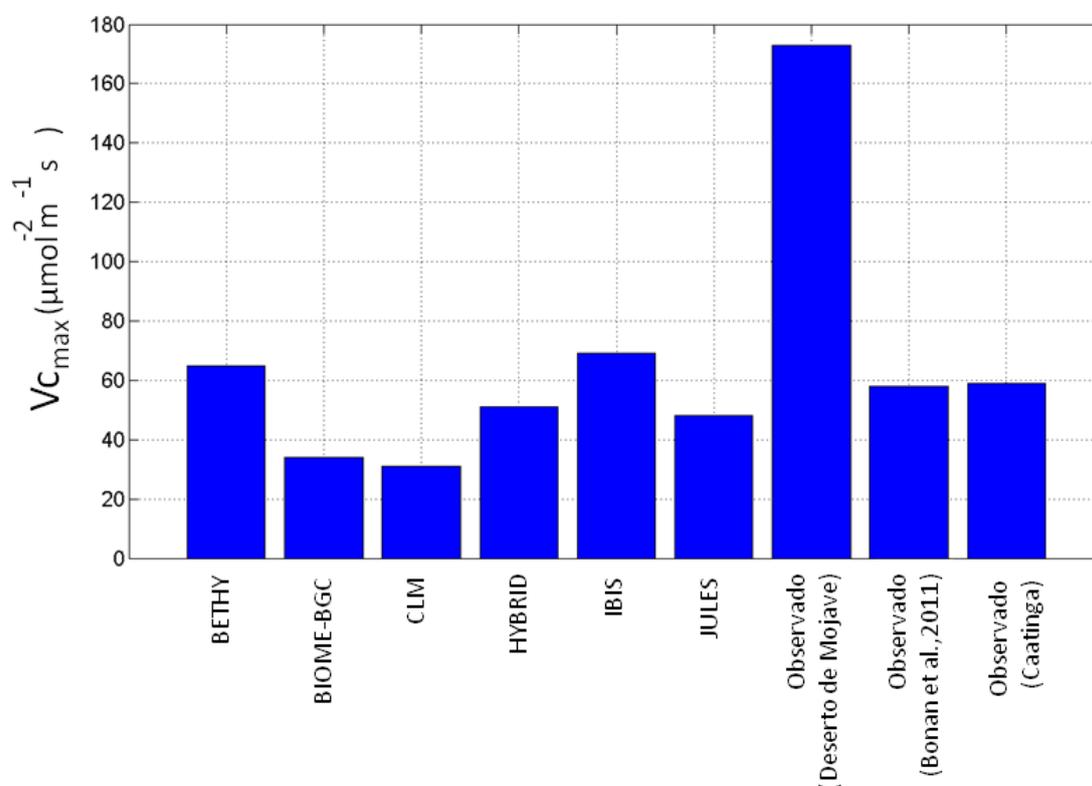


Figura 7.20 Comparação de  $V_{c_{max}}$  definido para diversos modelos para o TFP: arbustos decíduos e dados de  $V_{c_{max}}$  observados (Bonan et al., 2011) e observados na Caatinga (todos os valores obtidos nas campanhas em Petrolina-PE)

Outra observação a discutir, é a ocorrência de um número bem maior de casos tendo a assimilação por carboxilação (**Ac**) como limitante menor do que a assimilação por transporte de elétrons (**Aj**) como limitante (Figura 7.3). Este resultado sugere que uma PAR intensa do ambiente teve uma influência significativa no resultado, dando valores mais altos de **Aj** em comparação a **Ac**, sendo que a equação de assimilação fotossintética é dada por

$$A = \min(A_c, A_j, A_t)$$

Desta maneira a assimilação através de carboxilação foi determinante nos resultados da PPB.

Em relação aos parâmetros Balanço de Energia e calor sensível (H), a calibração de  $V_{C_{max}}$  não provocou significativas diferenças nos resultados. Em relação ao calor latente (LE), houve uma melhora na representação. E confirmou-se a sensibilidade e a forte correlação de  $V_{C_{max}}$  para a produtividade de um ecossistema.

Em relação aos cenários, o resultado mostra que a fertilização é proporcional à densidade de  $CO_2$  na atmosfera para os cenários (IPCC RCPs 2.6, 4.5, 6.0, 8.5). No entanto, esse é apenas um exercício com a variável concentração de  $CO_2$  e não são levados em conta o aumento de temperatura que ocorreria num cenário de mudanças globais, a aclimatação da vegetação, nem a limitação de nutrientes (N, P) que restringiriam a assimilação de carbono (KATTGE et al., 2009; WALKER et al., 2014) e a vegetação não teria esse crescimento exponencial como demonstram as Figuras 7.14 e 7.15. Certamente que havendo um aumento de  $CO_2$  na atmosfera, ocorrerá também um aumento de temperatura decorrente da intensificação do efeito estufa, no entanto, este trabalho não leva em conta esse aumento de temperatura. Para se tornar mais realista, a simulação deve constar além do aumento da concentração de  $CO_2$  e em decorrência disto, a intensificação do efeito estufa e o aumento de temperatura que deve ter um impacto sobre a quantidade e a distribuição de chuvas. Esta questão pode ser uma proposta para trabalho futuro executando o INLAND com algum Modelo de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA).



## 8. CONCLUSÕES

Os trabalhos no laboratório comprovam outros resultados com plantas cultivadas em alta concentração de CO<sub>2</sub> que já foram relatados na literatura, como ganho de biomassa, aumento no número de folhas, crescimento e Eficiência do Uso da Água. Este é o primeiro trabalho desta natureza que se realiza para o semiárido brasileiro. Outros estudos deverão ser realizados para aprofundar esta questão. Também serão importantes experimentos com FACE, tendo maior duração para que os resultados possam ser utilizados para a calibração de modelos do sistema terrestre e contribuir para estimar respostas dos ecossistemas às mudanças globais como aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e aumento de temperatura média global.

Este trabalho demonstrou que medidas ecofisiológicas obtidas em campo podem contribuir para a calibração dos parâmetros de Modelos de Vegetação Global Dinâmicos (DGVMs). Comparando técnicas de mineração de dados para lidar com uma amostra de dados reduzida, foi possível propor valores de  $V_{C_{max}}$  discretos, mais realistas com as condições ambientais (DPV e temperatura do ar) do que uma simples média de  $V_{C_{max}}$  como é realizado no modelo INLAND. Após a calibração, os resultados demonstraram melhor representação da produtividade e do Uso da Eficiência da Água em comparação com o modelo NÃO CALIBRADO.

Considerando que existe a questão de que os modelos tem o valor de  $V_{C_{max}}$  subestimado, a média obtida em campo é muito próxima de vários modelos, o que se supõe que no caso dos modelos IBIS e INLAND, os valores de  $V_{C_{max}}$  não estão subestimados. Uma regressão linear múltipla (Multi Linear Regression - MLR) foi o suficiente para se conseguir um bom resultado. Ainda, a implementação de uma regressão é uma tarefa bastante simples para se aplicar ao modelo.

A metodologia adotada em que se realizam medidas na Caatinga após chuvas e, portanto se assume que a variável umidade do solo está a 100 %, e se utiliza o Déficit de Pressão de Vapor ao nível da Folha ( $DPV_F$ ), temperatura do ar e

PAR (radiação fotossintética ativa) como variáveis independentes poderá ser aplicada em trabalhos futuros para a predição do  $V_{C_{max}}$ , e por conseguinte da produtividade. A experiência comprovou a dificuldade de se realizar medidas de fotossíntese em períodos que não sejam subsequentes às chuvas. Esta metodologia seria uma maneira de contornar as dificuldades naturais e instrumentais para se trabalhar no semiárido.

Este trabalho representa uma contribuição para se formar um banco de dados ecofisiológicos para a região tropical. Será necessário expandir essa base de dados com trabalhos futuros. Esta tarefa vai permitir o refinamento da calibração de Modelos do Sistema Terrestre e DGVMs

Este trabalho tem o fator de ineditismo no Brasil, que foi a realização e utilização de medidas ecofisiológicas em campo com o propósito de calibrar um Modelo de Vegetação Global Dinâmica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIDE, T. M. et al. Deforestation and Reforestation of Latin America and the Caribbean (2001–2010). **Biotropica**, v. 45, n. 2, p. 262–271, March 2013. DOI: 10.1111/j.1744-7429.2012.00908.x.

AINSWORTH, E. A. et al. Is stimulation of leaf photosynthesis by elevated carbon dioxide concentration maintained in the long term? A test with *Lolium perenne* grown for 10 years at two nitrogen fertilization levels under Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE). **Plant, Cell and Environment**, 26, 705–714. 2003.

AINSWORTH, E. A., LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. **New Phytologist**, v. 165 p. 351–372, 2005.

AINSWORTH, E.A., ROGERS, A., LEAKEY, A.D.B., HEADY, L.E., GIBON, Y., STITT, M., ULRICH, S. Does elevated atmospheric [CO<sub>2</sub>] alter diurnal C uptake and the balance of C and N metabolites in growing and fully expanded soybean leaves? **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 3, p. 579–591, 2007.

AINSWORTH, E.A., ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO<sub>2</sub>]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell and Environment**, v. 30, p. 258–270 - doi: 10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x, 2007.

AMTHOR, J.S. The role of maintenance respiration in plant growth. **Plant Cell Environ.**, v.7, p. 561-569, 1984.

ARENQUE, B.C. **Metabolismo de carboidratos da espécie amazônica *Senna reticulata* sob cultivo em alto CO<sub>2</sub>**. 2010. Dissertação (Mestrado em Biologia) - Instituto de Biociências - USP, São Paulo, 2010.

ARENQUE, B.C. Responses of *Senna reticulata*, a legume tree from the Amazonian floodplains, to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and waterlogging. **Trees**. DOI 10.1007/s00468-014-1015-0. 2014.

ARAUJO FILHO, J. C.. Relação solo e paisagem no bioma caatinga. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA, 14., 2011, Dourados-MS. **Anais...** Dourados : Anpege, 2011. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/896995/1/CoelhoXIVSBGFA1.pdf>. Acesso em: 27 agosto 2014.

ARORA, V.K. Simulating energy and carbon fluxes over winter wheat using coupled land surface and terrestrial ecosystem models. **Agric For Meteorol.**, v.118, p. 21–47, 2003.

ARORA, V.K.; G.J. BOER. Simulating competition and coexistence between plant functional types in a dynamic vegetation model. **Earth Interactions**, v. 10, n. 10, p. 1, 2006.

ARORA V.K.; BOER, G.J. Uncertainties in the 20th century carbon budget associated with land use change. **Glob Chang Biol.**, v.16, p.3327–3348. CTEM – 2010. Disponível em:<http://www.cccma.ec.gc.ca/ctem/competition/> Acesso em: 18 de dezembro de 2014.

Atmospheric Carbon Dioxide Record from Mauna Loa– Disponível em: <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/sio-mlo.html>. Acesso em: 12 de novembro de 2011.

BACHELET D. et al. **MC1**: a dynamic vegetation model for estimating the distribution of vegetation and associated ecosystem fluxes of carbon, nutrients, and water technical documentation. version 1.0. Corvallis, OR: United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station General Technical Report PNW-GTR-508 June 2001.

BAKER, I.T. Seasonal drought stress in the Amazon: Reconciling models and observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, G00B01, 2008. doi:10.1029/2007JG000644.

BALL J.T.; BERRY J.A. **The ci/cs ratio**: a basis for predicting stomatal control of photosynthesis. Washington: Carnegie Institute Washington Yearbook 81, 88–92, 1982.

BALL, J.T., WOODROW, I.E., BERRY, J.A. A model predicting stomatal conductance and its role in the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: BIGGINS, J. (ed.). **Progress in photosynthesis**. The Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers - p. 221-224. 1987

BEER, C. et al. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. **Global biogeochemical cycles**, v. 23, GB2018, doi:10.1029/2008GB003233. 2009

BERNACCHI C. J. et al. Improved temperature response functions for models of Rubisco limited photosynthesis. **Plant, Cell Environ.**, v. 24, p. 253–259, 2001.

BERRY, J.A.; BEERLING, D.J.; FRANKS, P.J. Stomata: key players in the earth system, past and present. **Plant Biology**. DOI 10.1016/j.pbi. 04.013. 2010.

BEST M. J. et al., 2011. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes. **Geosci. Model Dev.**, v. 4, p. 677–699, 2011 - doi:10.5194/gmd-4-677-2011.

- BLOOM, A.J.; MOONEY, H.A.; BJÖRKMAN, O.; BERRY, J. Material and methods for carbon dioxide and water exchange analysis. **Plant, Cell and Environment**, v. 3, p. 371-376, 1980.
- BONAN, G.B. et al. Reconciling leaf physiological traits and canopy flux data: Use of the TRY and FLUXNET databases in the community land model version 4. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, G02026, 2012, doi:10.1029/2011JG001913.
- BOX, E. O. Plant functional types and climate at the global scale. **Journal of Vegetation Science**, v. 7, n. 3. Jun., 1996, p. 309-320.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional – MIN. **Nova delimitação do semi-árido brasileiro**. Brasília, 2006. 32 p.
- BROOKS, A., FARQUHAR, G.D. Effects of temperature on the CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> specificity of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and the rate of respiration in the light. **Planta**, v.165, p. 397-406, 1985.
- BROVKIN et al. A continuous climate-vegetation classification for use in climate-biosphere studies. **Ecological Modelling**, v. 101, p. 251-261. 1997.
- BUCKERIDGE, M.; AIDAR, M.P.M.; MARTINEZ, C.A.; SILVA, E.A. Respostas de plantas às mudanças climáticas globais. In: Buckeridge, M. S. (org.). **Biologia & mudanças climáticas no Brasil**. São Paulo: Rima Editora, 2008.
- BUDOWSKI, G. Distribution of tropical american rain forest species in the light of successional processes. **Turrialba**, v.15, n.1, p. 40-42, 1965.
- BUGMANN, H. Functional types of trees in temperate and boreal forests: classification and testing. **Journal of Vegetation Science**, v. 7, p. 359-370, 1996.
- BUITENWERF R.; BOND W.J.; STEVENS N.; TROLLOPE W.S.W. Increased tree densities in South African savannas: [50 years of data suggests CO<sub>2</sub> as a driver. **Glob Change Biology**, v. 18, p. 675–684, 2012.
- BÜNTGEN, U.; SCHWEINGRUBER, F.H. Environmental change without climate change? **New Phytol**, v. 188, p. 646–651, 2010.
- CAEMMERER, S. von, FARQUHAR, G.D. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. **Planta**, v. 153, p. 376-387, 1981.
- CAEMMERER, S. von. **Biochemical models of leaf photosynthesis**. Canberra: CSIRO Publishing, 2000. 165p.
- CAMPOS, G. E. P. et. al. Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions. **Nature**, v. 494,. doi:10.1038/nature11836. 2013.

CHAVES, M.M, MAROCO, J.P., PEREIRA, J.S. Understanding plant responses to drought –from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, v. 30, p. 239-264, 2003.

CHAVES , I. B.; LOPES, V. L.; FFOLLIOTT, P. F.; PAES-SILVA, A. .; Uma classificação morfo-estrutural para descrição e avaliação da biomassa da vegetação da caatinga. **Revista Caatinga** , ISSN 0100-316X. Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA).

CLARK, D.A. Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. **Philosophical Transaction of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v.359, p. 477–491, 2004.

CLARK D.B. et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics. **Geosci. Model Dev.**, v. 4, p. 701–722, 2011 - doi:10.5194/gmd-4-701-201.

COLLATZ, G. J.; BALL, J.T.; GRIVET, C.; BERRY, J.A. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 54, p. 107-136, 1991.

COLLATZ, G.J. et al. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C<sub>4</sub> plants. **Australian Journal of Plant Physiology**, 19, 519–538. 1992.

COSTA, L.C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L.J.C.; SEDIYAMA, G.C.; FERREIRA, W.P.M.; LEMOS, C.F. Potential forcing of CO<sub>2</sub> , technology and climate changes in maize ( *Zea mays* ) and bean ( *Phaseolus vulgaris* ) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 4, n.1, 2009a. 014013.

COSTA, M. H. et al., 2009. ESTADO-DA-ARTE DA SIMULAÇÃO DA TAXA DE FIXAÇÃO DE CARBONO DE ECOSISTEMAS TROPICAIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, 179-187, 2009b.

COX et al. A canopy conductance and photosynthesis model for use in a GCM land surface scheme. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p. 79–94, 1998.

COX, P.M. **Description of the “TRIFFID” dynamic global vegetation model.** Hadley Centre Technical Note 24, 2001.

CUNHA, A. P. M. A.; SAMPAIO, G.; ALVALÁ, R. C. S.; COSTA, M. H. Calibration and Validation of the Integrated Biosphere Simulator (IBIS) for Brazilian Semi-Arid Region. **Journal Applied Meteorology and Climatology**, v. 52, n. 12, p. 2753-2770,. doi:<[10.1175/JAMC-D-12-0190.1](https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0190.1)>. Dec. 2013.

- DAMATTA, F.M.; GRANDIS, A.; ARENQUE, B.C.; BUCKERIDGE, M.S. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. **Food Research International**, v. 43, n.7, p.1814-1823, 2010.
- DELIRE, C.; FOLEY, J. A. Evaluating the performance of a land surface/ ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments. **J. Geophys. Res.**, v. 104, p. 16895-16909, 1999.
- DENNING A.S. et al. Simulations of terrestrial carbon metabolism and atmospheric CO<sub>2</sub> in a general circulation model. Part 1: Surface carbon fluxes, **Tellus**, Ser. B, v. 48, p. 521– 542, 1996.
- DICKINSON R.E. Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. In: Hansen, J.E; Takahashi, T. (eds.). **Climate processes and climate sensitivity**: geophysical monograph. 29.American Geophysical Union, 58,1984.
- DIETZE, M C. Gaps in knowledge and data driving uncertainty in models of photosynthesis. **Photosynth Res**, v. 119, p 3–14, DOI 10.1007/s11120-013-9836-z. 2014.
- DONOHUE, R et al. Impact of CO<sub>2</sub> fertilization on maximum foliage cover across the globe's warm, arid environments. **Geophysical Research Letters**, v. 40, 3031–3035, doi:10.1002/grl.50563, 2013.
- DRUMMOND, M.A.;KILL, L.H.P.; NASCIMENTO,C.E.S. Inventário e sociabilidade de espécies arbóreas e arbustivas da caatinga na região de Petrolina, PE. **Brasil Florestal** , Brasília, v. 21, n. 74, p. 37-43, set., 2002.
- DRUMMOND, M.A. et al. PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE BIOMASSA DE ESPÉCIES ARBÓREAS NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.32, n.4, p.665-669, 2008.
- EMBRAPA SOLOS. **Solos do Nordeste** - mapa exploratório- reconhecimento de solos do município de Petrolina. 2001. Disponível em: <http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/pe/petrolina.pdf>. Acesso em: 28 de agosto de 2014.
- FALGE, E. et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.107, p. 43-6, 2001.
- FARQUHAR, G.D.; CAEMMERER, S. von, BERRY, J.A. A Biochemical Model of Phtosynthetic CO<sub>2</sub> Assimilation in Leaves of C<sub>3</sub> Species. **Planta**, v. 149, n. 1, p. 78 90, 1980.
- FARQUHAR,G.D.; CAEMMERER,S.von. Modelling of photosynthetic responses to environmental conditions. In: LANGE, O.L.; NOBEL, P.S.; OSMOND, C. B.; ZIEGLER, H. (Eds.). **Physiological plant ecology II**. encyclopedia of plant physiology new series. Heidelberg: Springer-Verlag, p.550-587. 1982.

FARQUHAR, G.; SHARKEY, T. Stomatal conductance and photosynthesis. **Annals Review of Plant Physiology** v. 33, p.317-345, 1982.

FERREIRA, A.G.; MELLO, N.G.S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, dez., 2005.

FISHER, R. et al. Assessing uncertainties in a second-generation dynamic vegetation model caused by ecological scale limitations. **New Phytologist**, v.187, p. 666–681, 2010. doi: 10.1111/j.1469-8137.2010.03340.x. 2010.

FOLEY, J.A.; PRENTICE, C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**. v. 10, n. 4, p. 603-628, Dec., 1996.

FORD, A. **Modeling the environment** – an introduction to system dynamic models of environmental systems. 2. ed. Island Press, 2009.

FRIEND A.D.; WHITE, A. Evaluation and analysis of a dynamic terrestrial ecosystem model under preindustrial conditions at the global scale. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, p.1173–1190, 2000.

FRIEND A.D. Terrestrial plant production and climate change. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 5, p. 1293–1309, 2010. doi:10.1093/jxb/erq019.

GERTEN, D. et al. Terrestrial vegetation and water balance—hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. **Journal of Hydrology**, v. 286, p. 249-270, 2004.

GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. **Princípios de estatística em ecologia**. Artmed Editora, 2011.

GRANDIS, A. **Respostas fotossintéticas e de crescimento da espécie amazônica *Senna reticulata* sob elevada concentração de CO<sub>2</sub>**. Dissertação de mestrado. Instituto de Biociências - USP, 2010 .

GIULIETTI, A.M. et al. **Flora da caatinga**. [S.l.]: MMA (Instituto de Milênio), 2006.

HAN, J.; KAMBER, M. **Data mining concepts and techniques**. San Francisco: Academic Press, 2001. 548 p.

HAXELTINE, A.; PRENTICE, I.C. A general model for the Light-use efficiency of primary production. **Functional Ecology**, v.. 10, n. 5 (Oct., 1996). 1996a.

HAXELTINE, A., PRENTICE, I.C. BIOME3: an equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. **Global Biogeochemical Cycles**, 10, p. 693–709. 1996b.

HE H.S. et al. **A spatially explicit model of forest landscape disturbance, management, and succession. 2012. Landis PRO 7.0 users guide.** Disponível em: [http://landis.missouri.edu/files/LANDIS\\_PRO\\_70\\_UserGuide.pdf](http://landis.missouri.edu/files/LANDIS_PRO_70_UserGuide.pdf) Acesso em: 2 de dezembro de 2014.

HICKLER, T. et al. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. **Global Ecology & Biogeography**, v. 21, p. 50-63, 2012.

HOGG, R. V.; LEDOLTER, J. **Engineering statistics**. New York: MacMillan, 1987.

HSIEH, C.; KATUL, G.; CHI, T. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. **Advances in Water Resources**, v. 23, p. 765-772, 2000.

HOFFMANN, W.A.; POORTER, H. Avoiding bias in calculations of relative growth rate. **Annals of Botany**, v. 80, v. 37-42, 2002.

HUNT, R. Plant Growth Curves. **The functional approach to plant growth analysis**. London: E. Arnold, 1982.

HUNTINGFORD, C. et al. Simulated resilience of tropical rainforests to CO<sub>2</sub>-induced climate change. **Nature geoscience**, 2013. DOI: 10.1038/NGEO1741 Letters. March, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Brasil –2012**. modelo InLand/IBIS – manual do usuário. Disponível em: [http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/arquivos/manual\\_InLand-IBIS.pdf](http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/arquivos/manual_InLand-IBIS.pdf) Acessado em 14 Fev., 2015.

IPCC. **WGII AR5 Chapter 27-** Central and South America. 2014a. Final Draft

IPCC. **WGII AR5**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/> Acessado em 21 de outubro de 2014b. Fifth Assessment Report (AR5).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Modelo InLand/IBIS** – manual do usuário. São José dos Campos, 2012. Disponível em: [http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/arquivos/manual\\_InLand-IBIS.pdf](http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/arquivos/manual_InLand-IBIS.pdf). Acesso em: fevereiro de 2015.

JACOBS, C. **Direct impact of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on regional transpiration**, Ph.D. thesis, Wageningen Agricultural University, 1994.

JARVIS, P.G.; McNAUGHTON, K.G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. **Advances in Ecological Research**. 15:1-49. 1986.

JARVIS, P.G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B**, 273, 593–610. 1976.

KATTGE, J.; KNORR, W.; RADDATZ, T.; WIRTH, C. Quantifying photosynthetic capacity and its relationship to leaf nitrogen content for global-scale terrestrial biosphere models. **Glob Chang Biol**, v. 15, p. 976–991, 2009.

KATTGE, J.; DIAZ, S.; LAVOREL, S. et al. TRY—a global database of plant traits. **Glob Chang Biol**, v. 17, p. 2905–2935, 2011.

KAYANO, M.T; ANDREOLI, R.V. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA, M. G. A. J (eds.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. ISBN 978-85-86238-92-5. .

KING, D. A. Linking tree form, allocation and growth with an allometrically explicit model. **Ecological Modelling**, v. 185, n. 1, p.77-91, 2005.

KNORR, W. Annual and interannual CO<sub>2</sub> exchanges of the terrestrial biosphere: process-based simulations and uncertainties. **Global Ecology and Biogeography**, v. 9, n. 3, p. 225–252, June 2000.

KÖRNER, C. Scaling from species to vegetation: the usefulness of functional groups. In: SCHULZE, E-D;MOONEY, H. (eds) **Biodiversity and ecosystem function**. Berlin, Heidelberg, NY: Springer Ecol Studies 99, p 117-140. 1993.

KÖRNER C. Leaf diffusive conductances in the major vegetation types of the globe. **Ecophysiology of Photosynthesis**. E. D. Schulze and M. M. Caldwell. New York, Springer-Verlag: 463-490. 1995.

KÖRNER, C. Tropical forests in a CO<sub>2</sub>-rich world. **Climatic Change**, v. 39, p. 297–315, 1998.

KÖRNER, C. Plant CO<sub>2</sub> responses: an issue of definition, time and resource supply. **New Phytologist**, n. 172, p. 393-411, 2006.

KRINNER, G. et al. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 19, n. 1, GB1015, 2005. DOI: 10.1029/2003GB002199.

KUCHARIK, C.J. et al. Testing the performance of a Dynamic Global Ecosystem Model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**. v. 14, n. 3, p. 795-825, Sep., 2000.

KUCHARIK, C.J. et al. A multiyear evaluation of a dynamic global vegetation model at three AmeriFlux forest sites: vegetation structure, phenology, soil temperature, and CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O vapor exchange. **Ecological Modelling**, v. 196, n. 1-2, p. 1-31, 2006.

- KULL, O. NIINEMETS, U. Distribution of leaf photosynthetic properties in tree canopies: comparison of species with different shade tolerance. **Funct Ecol** 12(3):472–479. 1998.
- LAVOREL, S. et al. Plant functional types: are we getting any closer to the holy grail? In: Canadell, J.; Pataki, D.; Pitelka, L. (orgs.). **Terrestrial ecosystems in a changing world**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- LEAKEY, A.D.B. Elevated CO<sub>2</sub> effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, No. 10, pp. 2859–2876, 2009 doi:10.1093/jxb/erp096 Advance Access publication 28 April, 2009.
- LeBAUER, D.S. et al. Facilitating feedbacks between field measurements and ecosystem models. **Ecological Monographs**, v. 83, n.2, p. 133–154, 2013.
- LEUNING, R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C<sub>3</sub> plants. **Plant, Cell and Environment**, 18 339-355. 1995.
- LONG, S. P.; BERNACCHI, C. J. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? Procedures and sources of error. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2393±2401, Nov. 2003. DOI: 10.1093/jxb/erg262.
- LONG, S.P.; DRAKE, B.G. Effect of the long-term elevation of CO<sub>2</sub> concentration in the field on the quantum yield of photosynthesis of the C<sub>3</sub> sedge, *scirpus olneyi*. **Plant Physiol.**, v. 96, n. 1, p. 221–226, May 1991.
- LONG, S.P.; HÄLLGREN, J.E. Measurements of CO<sub>2</sub> assimilation by plants in the field and laboratory. In: HALL, D.O., SCURLOCK, J.M.O., BOLHAR-NORDENKAMPF, H.R., LEEGOOD, R.C.; LONG, S.P. (Eds.). **Photosynthesis and productivity in a changing environment: a field and laboratory manual**. London: Chapman and Hall, 1993. p.129-167.
- LONG, S.P. et al. Rising Atmospheric Carbon Dioxide: Plantas FACE the Future. **Annu. Rev. Plant Biol.** 55:591–628 doi: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141610. 2004.
- LU JH, JI, J.J. A simulation and mechanism analysis of longterm variations at land surface over arid/semi-arid area in north china. **J Geophys Res Atmospheres**, v. 111, n. D9, p.1–22, 2006.
- MAX PLANCK INSTITUTE FOR BIOGEOCHEMISTRY. **Eddy covariance gap-filling & flux-partioning tool**. Disponível em: <http://www.bgc-jena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/method.php>. Acesso em: 3 de fevereiro de 2014.
- MEDVIGY D. et al. Mechanistic scaling of ecosystem function and dynamics in space and time: ecosystem demography model version 2. **Journal of**

**Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 114, G01002, Mar 2009.  
doi:10.1029/2008JG000812.

MERCADO L.M. et al. Improving the representation of radiation interception and photosynthesis for climate model applications. **Tellus**, v. B 59, p. 553–565, 2007.

MISSION, L. et al. Seasonality of photosynthetic parameters in a multi-specific and vertically complex forest ecosystem in the Sierra Nevada of California. **Tree Physiology** 26, 729–741. 2006

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da CAATINGA**. Brasília-DF, 2010. Serviço Florestal Brasileiro

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caatinga**. 2014<sup>a</sup>. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>. Acesso em 16 de junho de 2014.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Desertificação**. 2014<sup>b</sup>. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/combate-a-desertificacao/convencao-da-onu/historico>. Acesso em 21 de novembro de 2014.

NAKICENOVIC, N.; SWART, R. (Eds.). **Emissions scenarios**. Cambridge: University Press. IPCC, 2000. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0> Acesso em 20 de novembro de 2014<sup>c</sup>.

NAUMBURG, E. et al. Photosynthetic responses of Mojave Desert shrubs to free air CO<sub>2</sub> enrichment are greatest during wet years. **Global Change Biology**, v. 9, In. 2, p. 276–285, Feb. 2003.

NEILSON, R.P. A model for predicting continental scale vegetation distribution and water balance. **Ecol Appl**, v, 5, n. 2, p.362–85, 1995.

NOAA – **Recent monthly mean carbon dioxide measured at Mauna Loa Observatory, Hawaii**. Disponível em: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> .Acesso em 12 de outubro de 2014.

OLESON, K.W. et al. **Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM)**. 2013. Disponível em: [http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/clm/CLM45\\_Tech\\_Note.pdf](http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/clm/CLM45_Tech_Note.pdf). Acesso em 2 de janeiro de 2015

ONU – Organização das Nações Unidas. Acessado em 10 de abril de 2014. Disponível em: <http://www.onu.org.br/pior-seca-dos-ultimos-50-anos-no-nordeste-brasileiro-confirma-estatisticas-da-onu-sobre-escassez/>

OLIVEIRA, V.F., SILVA, E.A., ZAIDAN, L.B.P. & CARVALHO, M.A.M. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and water deficit on fructan metabolism in *Viguiera discolor* Baker. *Plant Biology* 15 (2013) 471–482, 2013.

PAULA, A. et al. Sucessão ecológica da vegetação arbórea em uma Floresta Estacional Semidecidual, Viçosa, MG, Brasil. **Acta Bot. Bras.** v.18 no.3 São Paulo July/Sept. 2004.

PAVLICK, R. et al. The Jena Diversity-Dynamic Global Vegetation Model (JeDi-DGVM): a diverse approach to representing terrestrial biogeography and biogeochemistry based on plant functional trade-offs. **Biogeosciences**, 10, 4137–4177. DOI:10.5194/bg-10-4137. 2013.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N. et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 61, p. 167–234. <http://dx.doi.org/10.1071/BT12225>. 2013.

PHILLIPS, O. L. et al. Drought–mortality relationships for tropical forests. **New Phytologist**, v. 187, p. 631–646, 2010.

POORTER, H.; POTHMANN P. Growth and carbon economy of a fast growing and a slow-growing grass species as dependent on ontogeny. **New Phytol**, 120, 159-166. 1992.

POORTER, H.; GARNIER, E. Ecological Significance in relative growth rate and its components. In: PUGNAIRE, F.; VALLADARES, F. (Eds.). **Functional plant ecology**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group. 725p. 2007.

POORTER, H. Plant growth and carbon economy. In: **Encyclopedia of Life Sciences**. London, UK: Nature publishing Group. 2002.

POORTER, H. et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist** 193: 30–50 doi: 10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x. 2012.

POTTER, C.S.; KLOOSTER A. Dynamic global vegetation modelling for prediction of plant functional types and biogenic trace gas fluxes. **Global Ecology and Biogeography**, v. 8, p. 473–488, 1999.

PRENTICE, I.C. et al. Dynamic global vegetation modeling: quantifying terrestrial ecosystem responses to large-scale environmental change. In: CANADELL, J.; PATAKI, D.; PITELKA, P. (orgs.). **Terrestrial ecosystems in a changing world**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.

PRINCE S.D. et al. Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation. **Global Change Biology**, v. 13, p. 1308–1313, 2007.

QIAN, S. S. **Environmental and ecological statistics with R**. A. Boca Raton, FL, USA: Chapman & Hall Book, 2010. 421 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Probio** - projeto de conservação e utilização sustentável da diversidade biológica brasileira – subprojeto: levantamento da cobertura vegetal e do uso do solo do bioma caatinga . Brasília, 2007.

RANDALL, D.A. et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for GCMs. Part III: The greening of the Colorado State University General Circulation **Model, J. Clim.**, v. 9, p. 738– 763, 1996.

RCP – Database (versão 2.0).. Disponível em:  
<http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome>  
Acesso em: 1 de setembro de 2014.

REICHSTEIN, M. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1424-1439, 2005.

ROCHA, H. R.; NOBRE, C.A. ; BONATTI, J.P.; WRIGHT, I. R.; SELLERS, P.J. A vegetation atmosphere interaction study for Amazonian deforestation using field data and a 'single column model. **Q. J. Roy. Meteor. Soc.**, v.122, p. 567-594, 1996.

RODAL, M. J. N.; SAMPAIO, E. V. S. B. A vegetação do bioma caatinga. In: SAMPAIO, E. V. S. B.; GIULIETTI, A. M.; VIRGÍNIO, J.; GAMARRA-ROJAS, C. F. L. (Eds.). **Vegetação e flora da caatinga**. Recife: PNE/CNIP, 2002. p. 11-24.

ROGERS, A. et al. Will Elevated Carbon Dioxide Concentration Amplify the Benefits of Nitrogen Fixation in Legumes? **Plant Physiology** v. 151, p. 1009–1016, 2009.

ROGERS, A. The use and misuse of  $V_{c,max}$  in Earth System Models. **Photosynth Res**, v. 119, p. 15–29, 2014. DOI 10.1007/s11120-013-9818-1.

ROTENBERG, E.; YAKIR, D. Contribution of semi-arid forests to the climate system. **Science**, v. 327, p.451–454, 2010.

RUNNING, S. et al. **Biome BGC**. 2010. Disponível em:  
<http://www.ntsug.umt.edu/project/biome-bgc>. Acesso em: 20 de dezembro de 2014.

SAGE, R. F. Acclimation of photosynthesis to increasing atmospheric CO<sub>2</sub>: The gas exchange perspective. **Photosynthesis Research**, v. 39, p. 351–368, 1994.

SAGE, R. F. How Terrestrial Organisms Sense, Signal, and Respond to Carbon Dioxide. **Integ. and Comp. Biol.**, v. 42, p. 469–480, 2002.

SAGE R. F., KUBIEN, D.S. The temperature response of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> photosynthesis. **Plant, Cell and Environment**, v. 30, p. 1086–1106, 2007.

SAMPAIO, E.V.S.B; ARAÚJO, M.S.B.; SAMPAIO, Y.S.B. Impactos Ambientais da Agricultura no Processo de Desertificação do Nordeste no Brasil. XXX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo – **Revista de Geografia**, v. 22, No 1 2005.

SANTOS, M.G. et al. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? **Theor. Exp. Plant Physiol.** 2013. DOI 10.1007/s40626-014-0008-0.

SATO H. et al. SEIB–DGVM: A new Dynamic Global Vegetation Model using a spatially explicit individual-based approach. **Ecological Modelling**, v. 200, p. 279–307, 2007.

SCHAEFER K. et al. Combined Simple Biosphere/Carnegie Ames Stanford Approach terrestrial carbon cycle model. **Journal of Geophysical Research**. v. 113 G03034, 2008. doi: 10.1029/2007JG000603.

SCHAEFER K. et al. A model-data comparison of gross primary productivity: results from the north american carbon program site synthesis. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, G03010, 2012. doi:10.1029/2012JG001960.

SCHEITTER, S.; HIGGINS S.I. Impacts of climate change on the vegetation of Africa: an adaptive dynamic vegetation modeling approach. **Global Change Biology** 15, 2224-2246, doi: 10.1111/j.1365. 2009.

SCHEITER, S. et al. Next-generation dynamic global vegetation models: learning from community ecology. **New Phytologist**, 2013. doi: 10.1111/nph.12210.

SELLERS, P.J.; MINTZ, Y. A Simple Biosphere Model for Use with General Circulation Models. **Journal of Atmospheric Sciences**, 1986.

SELLERS, P.J. et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation, **J. Clim.**, 9, 676– 705. 1996a.

SELLERS, P.J. et al. Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO<sub>2</sub> on climate. **Science**, 271:1402-1405. 1996b.

SELLERS, P.J. et al. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, v. 275, p. 502– 509, 1997.

SHARKEY, T.D. Photosynthesis in intact leaves of C<sub>i</sub> plants: physics, physiology and rate limitations. **Botanical Review** 51:53-106. 1985.

- SHARKEY, T.D. 1988. Estimating the rate of photorespiration in leaves. **Physiologia Plantarum**. 73:147-152.
- SHEFFIELD, J. Little change in global drought over the past 60 years. **Letter Nature** – v. 491 - doi:10.1038/nature11575. 2012.
- SILVA, P. C. G.; MOURA, M. S. B.; KIILL, L. H. P.; BRITO, L. T. L.; PEREIRA, L. A.; SÁ, I. B.; CORREIA, R. C.; TEIXEIRA, A. H, C.; CUNHA, T. J. F.; GUIMARÃES FILHO, C. G. Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. In: SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. (Editores Técnicos). *Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação*. Petrolina-PE: Embrapa, 2010.
- SILVA, G .C.; SAMPAIO, E.V.S.B. Biomassas de partes aéreas em plantas da Caatinga. **R. Árvore**. Viçosa-MG, v.32, n.3, p.567-575, 2008.
- SIMS, D.A.; LUO, Y.; SEEMANN, J.R. Comparison of photosynthetic acclimation to elevated CO<sub>2</sub> and limited nitrogen supply in soybean. **Plant, Cell & Environment**. v 21, n. 9, p. 945–952, Sep. 1998.
- SMITH, B. et al. Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within European climate space. **Global Ecology & Biogeography**, v. 10, p. 621-637, 2001.
- SMITH N.G.; DUKES J.S. Plant respiration and photosynthesis in global-scale models: incorporating acclimation to temperature and CO<sub>2</sub>. **Global Change Biology**- doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02797.x. 2012.
- SITCH, S. et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic vegetation model. **Global Change Biology**, v. 9, p. 161–185, 2003.
- STIT, M. Rising CO<sub>2</sub> levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. **Plant, Cell & Environment**. v. 14, n. 8, p. 741–762, Oct. 1991.
- SUZUKI, S.; NAKAMOTO, H.; KU, M. S. B.; EDWARDS, G. E., Influence of leaf age on photosynthesis, enzyme activity, and metabolite levels in wheat. **Plant Physiology**, v. 84, p.1244-1248, 1987.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.
- TILMAN, D. The resource-ratio hypothesis of plant succession. **American Naturalist**, v. 125, p. 827–852, 1985.
- THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology** - a quantitative approach to problems in plant and crop physiology. New York: Academic Press, 1976.

- TOURIGNY, E. **Multi-scale fire modeling in the neotropics: coupling a land surface model to a high resolution fire spread model, considering land cover heterogeneity**. 2014. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.30.00.36-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GD37Q2>>. Acesso em: 09 fev. 2015.
- VU, J.C.V.; ALLEN, L.H.; GESCH, R.W. Up-regulation of photosynthesis and sucrose metabolism enzymes in young expanding leaves of sugarcane under elevated growth CO<sub>2</sub>. **Plant Science**, v.171, p. 123–131, 2006.
- WALKER, A.P. et al. The relationship of leaf photosynthetic traits –  $V_{\text{cmax}}$  and  $J_{\text{max}}$  – to leaf nitrogen, leaf phosphorus, and specific leaf: a meta-analysis and modeling study. **Ecology and Evolution**, p. 3218-3235. Doi: 10.1002/ece3.1173. 2014.
- WANG, H.; PRENTICE I. C.; DAVIS, T. W. Biophysical constraints on gross primary production by the terrestrial biosphere. **Biogeosciences**, v. 11, p. 5987–6001, 2014. Doi:10.5194/bg-11-5987.
- WAYNE, G. P. RCP – **The beginner's guide to representative concentration pathways**. Disponível em: <http://www.skepticalscience.com/rcp.php>. Acesso em: 14 de outubro de 2014.
- WITTEN, I.H., FRANK, E. **Data Mining**: practical machine learning tools and techniques with Java Implementations. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2000. 371 p.
- WOODWARD, F.I et al. A global land primary productivity and phytogeography model. **Global Biogeochemical Cycles**, 9, 471–490. 1995.
- WOODWARD, F.I.; LOMAS, M.R. Vegetation-dynamics –simulating responses to climate change. **Biological Reviews**, 79, 643–670. 2004.
- WULLSCHLEGER, S.D. Biochemical limitations to carbon assimilation in C<sub>3</sub> plants – A retrospective analysis of the  $A_xC_i$  curves from 109 species. **J. Exp. Bot.**, v. 44, p. 907-920, 1993.
- YUAN, Q.Z.; ZHAO, D.S.; WU, S.H., DAI, E.F. Validation of the Integrated Biosphere Simulator in simulating the potential natural vegetation map of China. **Ecol Res**, v. 26, p. 917–929, 2011. DOI 10.1007/s11284-011-0845-0.
- ZAEHLE, S.; FRIEND, A.D. Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 1. Model description, site-scale evaluation, and sensitivity to parameter estimates. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 24, GB1005, 2009. DOI: 10.1029/2009GB003521, 20.

ZIEHN, T. et al. Improving the predictability of global CO<sub>2</sub> assimilation rates under climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 38, L10404, doi:10.1029/2011GL047182, 2011.

## GLOSSÁRIO

**ATP:** Trifosfato de adenosina, adenosina trifosfato ou simplesmente ATP, é um nucleotídeo responsável pelo armazenamento de energia em suas ligações químicas. É formado a partir de ADP (Adenosina difosfato ou difosfato de adenosina) é um nucleotídeo, isto é, um composto químico formado por um nucleósido e dois radicais fosfato.

**CLOROPLASTO:** Organela que é o sítio da fotossíntese em organismos fotossintéticos eucariotos.

**CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA:** Medida do fluxo de água e dióxido de carbono através do estômato, para dentro e para fora da célula.

**ESTÔMATOS:** Abertura da epiderme foliar circundado por um par de células-guarda. O estômato regula o intercâmbio gasoso (água e CO<sub>2</sub>) de folhas, através do controle da sua abertura.

**NADP:** Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADP) é uma enzima aceptora de elétrons nas reações da via das pentoses-fosfato e na transformação de malato em piruvato pela ação da enzima málica, havendo redução de NADP<sup>+</sup> a NADPH.

**FOTOSSISTEMA:** Unidade funcional no cloroplasto que colhe energia luminosa para prover a transferência de elétrons e para gerar uma força motriz de prótons usada para sintetizar ATP

**FOTOSSISTEMA I (PSI):** Sistema de fotorreações que tem o máximo de absorção de luz vermelha longa (700 nm).

**FOTOSSISTEMA II (PSII):** Sistema de fotorreações que tem o máximo de absorção de luz vermelha (680 nm). Oxida a água.

**MESOFILO:** Tecido foliar encontrado entre as camadas epidérmicas superior e inferior.

**MICORRIZAS:** O termo é originado de duas palavras gregas: fungo e raiz. São associações simbióticas (mutualistas) de certos fungos e raízes de plantas, facilitando a absorção de nutrientes minerais pelas raízes.

**PI:** fosfato inorgânico utilizado na realização de fotossíntese

**POTENCIAL HÍDRICO:** potencial hídrico ( $\psi_w$ ) é uma medida de energia livre associada com água por unidade de volume (J m<sup>-3</sup>).  $\psi_w$  é uma função do potencial do soluto, do potencial de pressão e do potencial devido à gravidade:  $\psi_w = \psi_p + \psi_s + \psi_g$ . O  $\psi_g$  é desprezível para alturas abaixo de 5 metros.

**RUBISCO:** Acrônimo para a enzima do cloroplasto ribulose bifosfato carboxilase/oxigenase. Em uma reação de carboxilase, a rubisco usa CO<sub>2</sub>

atmosférico e ribulose-1,5-bisfosfato para formar duas moléculas de 3-fosfoglicerato. Ela também funciona como uma oxigenase que incorpora  $O_2$  a ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP). A competição entre  $CO_2$  e  $O_2$  por ribulose-1,5-bisfosfato limita a fixação líquida de  $CO_2$  (TAIZ; ZEIGER, 2009).

**SALINIZAÇÃO:** O processo de concentração de sais na solução do solo: sódio, magnésio e cálcio e que ocorre, de maneira geral, em solos no semiárido em que ocorre baixa precipitação pluviométrica e que possuam lençol freático próximo da superfície. A irrigação inadequada também contribui para a salinização do solo. A salinização diminui a fertilidade do solo.

## APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO DE REGRAS DO CART

Linhas de código do módulo **inland\_stomataib.F90** com a implementação das regras inferidas pelo algoritmo CART.

```
! -----  
! calculation of VpdL  
  es = 0.00; epv = 0.00; vpd = 0.00;  
  es = 6.108 * exp (17.27 * tleaf / ( tleaf + 237.3 ) )  
  epv = es * ( rh12 )  
  vpd = (es - epv)  
  vpd = vpd / 10 ! Divide by 10 converts from hexaPascal (hPa) to KiloPascal (kPa)  
  print *, 'VpdL: ', vpd  
! Implementation of CART  
  if (vpd .LT. 3.32671) then  
    if (tempC .LT. 31.5) then  
      if(vpd .LT.2.05587) then  
        vmaxls = 94.7e-06 ! vc25 = 69.4e-06  
      else  
        vmaxls = 58.9e-06 ! vc25 = 37.7e-06  
      endif  
    else  
      if(tempC .LT. 38.4 ) then  
        if (vpd .LT. 1.58638 ) then  
          vmaxls = 159.7e-06 ! vc25 = 93.0e-06  
        else  
          if ( vpd .LT. 3.07793 ) then  
            vmaxls = 113.0e-06  
          else  
            vmaxls = 156.6e-06 ! vc25 = 72.5e-06  
          endif  
        endif  
      else  
        vmaxls = 41.8e-06 ! vc25 = 14.3e-06  
      endif  
    endif  
  else  
    vmaxls = 47.0e-06 ! vc = 17.3e-06  
  endif
```



## APÊNDICE B – IMPLEMENTAÇÃO DE REGRAS DO K- MEANS

Linhas de código do módulo inland\_stomataib.F90 com a implementação das regras inferidas pelo algoritmo K-MEANS.

```
! Calculo da distancia euclidiana
! For normalization,
! Petrolina Campaigns: 2013 and 2014 LF
! Vpd1 = 4.5
! Temp = 39.3 -> 40
vpdNorm = (vpd - 1.09) / (4.5 - 1.09);
tempNorm = (tempC - 27.0) / (40.0 - 27.0);
d1 = sqrt( (temp1 - tempNorm)**2 + (vpd1 - vpdNorm)**2 );
d2 = sqrt( (temp2 - tempNorm)**2 + (vpd2 - vpdNorm)**2 );
d3 = sqrt( (temp3 - tempNorm)**2 + (vpd3 - vpdNorm)**2 );
d4 = sqrt( (temp4 - tempNorm)**2 + (vpd4 - vpdNorm)**2 );
d5 = sqrt( (temp5 - tempNorm)**2 + (vpd5 - vpdNorm)**2 );

if (d1 < d2 .AND. d1 < d3 .AND. d1 < d4 .AND. d1 < d5) then
  vmaxls = vc1;
elseif(d2 < d1 .AND. d2 < d3 .AND. d2 < d4 .AND. d2 < d5) then
  vmaxls = vc2;
elseif (d3 < d1 .AND. d3 < d2 .AND. d3 < d4 .AND. d3 < d5) then
  vmaxls = vc3;
elseif (d4 < d1 .AND. d4 < d2 .AND. d4 < d3 .AND. d4 < d5 ) then
  vmaxls = vc4;
elseif (d5 < d1 .AND. d5 < d2 .AND. d5 < d3 .AND. d5 < d4 ) then
  vmaxls = vc5;
else
  vmaxls = 101.0e-06; ! If no one, assumes Vc mean of Campaign 2013-2014 Petrolina
endif
print *, 'vmaxls: ', vmaxls
```



## APÊNDICE C – IMPLEMENTAÇÃO DA EQUAÇÃO OBTIDA DE MLR

Linhas de código do módulo inland\_stomataib.F90 com a implementação da equação obtida da Regressão Linear Múltipla (MLR).

```
epv = es * ( rh12 )
vpd = (es - epv)
vpd = vpd / 10 ! Divide by 10 converts from hexaPascal (hPa) to KiloPascal (kPa)
! Not convert to kiloPascal, because, regression was in hexaPascal
print *, 'VpdL: ', vpd

! nominal values for vmax of top leaf at 15 C (mol-co2/m**2/s)
! vmaxls = vmax_pft(9) ! 27.5e-06 ! Shrubs (evergreen or cold deciduous)
! vmaxls = -139.0 + (-53.3 * vpd) + (11.71 * tempC) + (-0.0241 * topparl(i)); ! Convert anticorrelation
vmaxls = -109.7 + (-38.3 * vpd) + (9.75 * tempC) + (-0.03 * topparl(i)); ! Convert anticorrelation
vmaxls = vmaxls * 1e-06 ! conversion
print *, 'VpdL: ', vpd
print *, 'vmaxls: ', vmaxls
print *, 'parl: ', parl
```